

**Thèse en cotutelle**

présentée à

**L' UNIVERSITE DE GRENOBLE**

Ecole Doctorale Terre-Univers-Environnement

et

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR**

Spécialité: Sciences de la terre de l'univers et de l'environnement

par

**Marianna Jacominy de Amorim MENDES**

***ETUDE DES FACTEURS QUI AFFECTENT LA PERFORMANCE DES  
GEOSYNTHETIQUES BENTONITIQUES SOUS FLUX DE GAZ ET LIQUIDES EN  
BARRIERES DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DECHETS***

***ALGUNS FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE  
GEOCOMPOSTOS BENTONÍTICOS SOB FLUXO DE GASES E LÍQUIDOS EM  
BARREIRAS DE ATERROS SANITÁRIOS***

Soutenue le 31 Mai 2010

Jury

Patrick PIERSON	Directeur de thèse
Ennio Marques PALMEIRA	Directeur de thèse
Maria das Graças GARDONI	Rapporteur
Delma de Mattos VIDAL	Rapporteur
Nathalie TOUZE-FOLTZ	Examinatrice
Manoel Porfírio CORDÃO NETO	Examinateur

Thèse préparée au sein du *Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE)*, au Cemagref, au *Programa de Pós-Graduação em Geotecnica* et en cotutelle à l'Université de Grenoble et Universidade de Brasília.

*Por meus exemplos de sabedoria,  
meus apoios incondicionais...  
meus pais, Mauro e Marizany*

## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi desenvolvido a partir de um acordo de cotutela entre o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e o *Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement* (LTHE), da *Université de Grenoble*, sob orientação dos professores Ennio Marques Palmeira (PhD) e Patrick Pierson (PhD). O *Institut de Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement* (Cemagref) também fez parte do acordo de cooperação, com a supervisão de Nathalie Touze-Foltz (PhD).

Agradeço aos professores Ennio Palmeira, Patrick Pierson e Nathalie Touze-Foltz, não só pela orientação e atenção, mas pelo exemplo de sabedoria, organização e motivação com a pesquisa. Todos foram muito presentes durante o desenvolvimento da pesquisa. De perto ou a quilômetros de distância pude sempre contar com apoio, orientação e compreensão. Vocês são motivos de inspiração, são meus exemplos.

Serei sempre grata aos técnicos de laboratório que com força e coragem se disponibilizaram a participar da pesquisa. Ao Senhor Arthur do laboratório de mecânica da UnB pela disponibilidade, sugestões e todas as soluções oferecidas para todo tipo de problema na montagem de um novo equipamento. Aos técnicos dos laboratórios da UnB, Vanilson, Ricardo e Guilherme que contribuíram na montagem do equipamento. Agradeço profundamente aos técnicos Henri Mora e Yves Orengo do LTHE que além de me acompanharem no trabalho pesado do laboratório, ainda contribuíram com alguns ensaios quando eu já estava de volta ao Brasil. À Didier Croissant, Rolland Gallo e Alain Thomas pela assistência no laboratório do Cemagref e pelas incontáveis trocas de conhecimentos geográficos e culturais etc, me ajudando na adaptação ao novo país.

Agradeço ao professor José Camapum de Carvalho pela primeira conversa na minha reintegração à *Geo* e pela ajuda na análise dos resultados na fase final da pesquisa. Agradeço também ao professor Manoel Porfírio por abrir o caminho para novas interpretações dos resultados obtidos, pelas sugestões e principalmente pelo exemplo de motivação e dedicação.

O desenvolvimento da tese contou com o apoio financeiro da CAPES, CNPq e EGIDE e fornecimento de materiais por parte da Huesker e CETCO. Agradeço imensamente à Johan Bruhier por possibilitar minha participação no EuroGeo4.

Não posso deixar de agradecer aos antigos e atuais colegas e amigos: Iris Luna Macedo que me adotou e acolheu na sua família; Márcia Mascarenha, apoio incondicional e fundamental durante a tese. Às novas colegas, Hellen Porfírio e Janaína Tatto que foram minhas companhias na minha reintegração à *Geo* depois de mais de um ano de ausência.

Aos colegas e amigos que fiz na França, que me acolheram e ajudaram na adaptação: Sandrine Paumier, Aurélien Claude, Matthieu Lafaysse, Remi Béguin, Guillaume Stoltz. Um agradecimento especial à Élodie Passeport e Maria Helena Ramos, que me acolheram no Cemagref, à Camille Barral, com quem tive o meu primeiro contato com o equipamento de ensaio da presente pesquisa no LTHE e à Matthias Staub, companhia constante no laboratório e de incondicional apoio e disponibilidade.

Meu agradecimento final à minha família, sobretudo pela paciência e pelo exemplo de equilíbrio emocional. Pela presença quando eu estive ausente. Por sempre confiarem no meu sucesso e por todos os momentos em que me convenceram de que eu me sairia bem.

## ABSTRACT

Geosynthetic Clay Liners (GCLs) are synthetic materials composed by a core of calcium or sodium bentonite, either in powder or granular, bonded to one or more geosynthetic layers (geotextile or geomembrane, in general). These layers are usually bonded by an adhesive, needle-punching, stitch-bonding or sewing. When hydrated and confined, they fulfil functions of liquid or gas barrier with their hydraulic performance depending in most cases on the hydraulic conductivity of the bentonite. Thanks to their low permeability to water and gases, GCLs are often used in municipal solid waste landfill applications, combined to compacted clay liners (CCL) or with geomembranes (GM) as part of both bottom and cover liners. Previous studies were conducted to investigate the most important factors that influence the gas/liquid flow rate through GCLs or composite liners. Although the nature of bentonite is so important in the permeability of the GCLs there is a lack of data in the literature regarding the influence of the nature of the bentonite on the gas flow through GCLs and liquid flow through composite liners involving GCLs. That is what this thesis aims at clarifying. Furthermore, in conjunction with the nature of the bentonite, the impact of the manufacturing process of the GCL on the flow rate and transmissivity at GM-GCL interfaces was also discussed. Two studies were performed: (i) investigation of the GCL permeability to gas simulating the covering conditions of municipal solid waste landfill; (ii) investigation of liquid transfer through composite liners GM-GCL-CCL due to a defect in the geomembrane, simulating typical conditions of bottom liners in landfills. In the first study, an apparatus recently proposed, based on the falling pressure method, was used in tests to verify the GCL permeability to gas. Three stitch bonded GCLs from the same manufacturer differing by the bentonite nature (natural sodium, natural calcium and activated calcium) were tested. The results showed that the gravimetric water content of the GCL necessary to attain a certain permeability value depends on the bentonite nature, which was not observed in terms of volumetric water content. However, other factors showed to be more important than the nature of bentonite in the GCL permeability to gas: the desiccation due to the gas flow can increase significantly the permeability, which compromise the GCL performance as a gas barrier. The second study focused in investigating the influence of the GCL characteristics in the liquid flow through a composite liner under bottom liners solicitations. Four types of GCLs with two different bonding processes (stitch-bonded or needle-punched) and different bentonites (natural sodium or natural calcium) were tested. The results obtained showed no significant differences among flow rate versus time in most of the tests performed, especially after steady-state conditions of flow having been reached. An analytical solution was employed to estimate the transmissivity of the GM-GCL interfaces. This solution also allowed predictions of flow rates and radius of wetted areas for typical configurations of composite liners in the field. The results obtained showed little influence of the nature of the bentonite and the predominance of influence of the presence of preferential flow paths between the geomembrane and the GCL surface on the transmissivity of GM-GCL interfaces and flow rates through composite liners.

## RÉSUMÉ

Géosynthétiques bentonitiques (GCLs) sont matériaux synthétiques composées par un noyau de bentonite sodique ou calcique, en poudre ou en granulats, liés à un ou plus couches de géosynthétiques (geotextiles ou geomembranes en générale). Les GCLs peuvent être aiguillettes, cousus, liés par adhésive, entre autres. Lorsque le GCL est confinée et hydratée, il présente de bonnes propriétés d'étanchéité pour accomplir la fonction de barrière. Sa performance dépend, généralement de la conductivité hydraulique de la bentonite. Grâce à leur faible perméabilité, les GCLs sont souvent installés au fond ou couverture des Installations de Stockage de déchets (ISD) associés avec l'argile compactée (CCL) ou avec la geomembrane (GM). Des études précédentes ont investigué les facteurs qui affectent la fuite de gaz/liquide au travers les GCLs ou les étanchéités composites. Malgré la nature de la bentonite soit si importante pour la perméabilité des GCLs, il n'y a pas dans la littérature concernant l'influence de la nature de la bentonite dans la fuite de gaz au travers les GCL ou la fuite de liquide au travers les étanchéités composites. C'est pour quoi cette étude s'intéresse. On propose d'étudier également l'effet du procès de manufacture du GCL dans l'écoulement de liquide et transmissivité de l'interface GM-GCL. Deux études sont été menés : (i) investigation de la perméabilité aux gaz des GCL ; (ii) investigation du transfert de liquide au travers des étanchéités composites GM-GCL-CCL du a un endommagement dans la GM. Pour la première étude un équipement proposé récemment, basée sur la méthode de chute de pression a été utilisé pour mesurer la perméabilité aux gaz des GCLs. Trois GCLs cousus à base de bentonites de différentes natures (sodique naturelle, calcique naturelle et calcique activée) ont été testés. Les résultats indiquent que la teneur en eau gravimétrique nécessaire pour atteindre une certaine valeur de perméabilité dépend de la bentonite. Concernant la teneur en eau volumique, pratiquement la même relation a été obtenue, indépendamment de la bentonite. D'autres facteurs ont affecté plus significativement la perméabilité au gaz des GCLs : la dessiccation du au flux de gaz peut causer l'augmentation de la perméabilité et compromettre la performance du GCL comme barrière étanche. La deuxième étude s'est concentré dans l'investigation de l'influence des caractéristiques du GCL sur l'écoulement de liquide au travers une étanchéité composite.GM-GCL-CCL. Quatre types de GCLs avec deux procès de manufacture (aiguilleté ou cousu) et deux natures de bentonite (sodique naturelle ou calcique naturelle) ont été testés. Les résultats indiquent que la nature de la bentonite n'affecte le flux que pendant le régime transitoire. Les valeurs de transmissivité de l'interface GM-GCL ont été calculées par une solution analytique qui a également possibilité des prédictions du débit de fuite au travers des étanchéités composites en configurations typiques du fond des ISD. Les résultats indiquent une faible influence de la nature de la bentonite dans l'écoulement de liquide au travers les étanchéités composites. Au même temps on a note une certaine influence des chemins préférentielles de flux, notamment pendant le régime transitoire.

## RESUMO

Geocompostos bentoníticos (GCLs) são materiais sintéticos compostos por um núcleo de bentonita sódica ou cálcica, em pó ou em grânulos, unido a uma ou mais camadas de geossintéticos (geotêxtil ou geomembrana, geralmente). Essas camadas são ligadas por adesivo, agulhagem ou costura. Quando hidratados e confinados, eles cumprem função de barreira de líquidos ou gases com o seu desempenho dependendo, na maioria dos casos, da condutividade hidráulica da bentonita. Graças à baixa permeabilidade aos líquidos e gases, GCLs são comumente usados em aterros sanitários, associados a camada de argila compactada (CCL) e geomembrana (GM) para compor as impermeabilizações de cobertura e fundo dessas instalações. Estudos precedentes investigaram os fatores mais influentes no fluxo de gás/líquidos através de GCLs ou barreiras compostas. Apesar da natureza da bentonita ser tão importante para a permeabilidade dos GCLs, não há dados na literatura a respeito da influência da natureza da bentonita no fluxo de gás através de GCLs ou fluxo de líquidos através de barreiras compostas envolvendo GCLs. Isso é o tema que a presente tese quer esclarecer. Além de estudar a influência da natureza da bentonita, o impacto do processo de manufatura do GCL na vazão e na transmissibilidade na interface GM-GCL também foi discutido. Dois estudos foram conduzidos: (i) investigação da permeabilidade ao gás de GCLs simulando as condições de cobertura de aterros sanitários; (ii) investigação do transporte de líquidos através de barreiras compostas GM-GCL-CCL devido a um dano na geomembrana, sob condições típicas do fundo de aterros sanitários. No primeiro estudo, um equipamento recentemente proposto, cujo funcionamento baseia-se no método da queda de pressão, foi usado em ensaios para verificar a permeabilidade ao gás de GCLs. Três GCLs costurados do mesmo fabricante, diferindo pela natureza da bentonita (sódica natural, cálcica natural e cálcica ativada) foram testados. Os resultados mostram que o teor de umidade gravimétrica necessário para atingir certa permeabilidade depende da natureza da bentonita. O mesmo não foi observado em termos de teor de umidade volumétrica, destacando a importância da estrutura da bentonita na sua permeabilidade. No entanto, outros fatores se mostraram mais importantes do que a natureza da bentonita na permeabilidade ao gás dos GCLs: a dessecação devido ao fluxo de gás pode aumentar significativamente a permeabilidade, o que compromete o desempenho do GCL como barreira. O segundo estudo focou na investigação da influência das características do GCL no transporte de líquido através de uma barreira composta sob condições típicas da base de aterros sanitários. Quatro tipos de GCLs com dois processos de manufatura (costurado ou agulhado) e duas bentonitas diferentes (sódica natural ou cálcica natural) foram ensaiados. Os resultados obtidos mostram que não houve influência significativa de vazão versus tempo para os ensaios conduzidos, especialmente depois de atingido o regime permanente de fluxo. Uma solução analítica foi empregada para estimar a transmissibilidade da interface GM-GCL. Essa solução permitiu também a previsão de vazamento e raio da área molhada em barreiras compostas de dimensões reais. Os resultados obtidos mostram pouca influência da natureza da bentonita na vazão e a predominância de caminhos preferenciais de fluxo na interface transmissível GM-GCL.

## 1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA .....	1
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DA PESQUISA .....	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE .....	3

## 1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....	6
1.2 MOTIVATION ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE .....	7
1.3 ORGANISATION DE LA THESE.....	8

---

## PARTE I

### 2 GEOSSINTÉTICOS COMO BARREIRAS EM ATERROS SANITÁRIOS

2.1 INTRODUÇÃO.....	12
2.2 GEOMEMBRANAS .....	14
2.2.1 Definição.....	14
2.2.2 Danos mecânicos .....	16
2.2.3 Proteção contra danos mecânicos .....	19
2.3 GEOCOMPOSTOS BENTONÍTICOS (GCL) .....	20
2.3.1 Definição.....	20
2.3.2 Bentonitas .....	24
2.4 BARREIRAS COMPOSTAS .....	29
2.5 COMENTÁRIOS FINAIS .....	31

### 2 GEOSYNTHETIQUES COMME BARRIERES ETANCHES DES ISD

RESUME .....	32
--------------	----



### **3 TRANSPORTE DE LÍQUIDOS E GASES ATRAVÉS DE BARREIRAS GEOSSINTÉTICAS**

3.1 VAZAMENTO DE GÁS NA COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS .....	33
3.1.1 Migração de gases através de meios porosos.....	33
3.1.2 Pesquisas sobre transporte advectivo de gases através de barreiras geossintéticas .....	37
3.1.3 Método da queda de pressão .....	46
3.1.4 Dessecação, fissuras e troca de cátions no campo.....	49
3.1.5 Comentários .....	51
3.2 VAZAMENTO DE LÍQUIDO NO FUNDO DE ATERROS SANITÁRIOS .....	52
3.2.1 Migração de líquidos através de barreiras compostas devido a um dano na geomembrana.....	52
3.2.2 Transmissibilidade da interface versus qualidade de contato.....	62
3.2.3 Equações empíricas para o cálculo da vazão através de dano na geomembrana ..	64
3.2.4 Pesquisas sobre o transporte advectivo de líquidos através de barreiras compostas .....	68
3.2.5 Comentários .....	76

### **3 TRANSFERT DE LIQUIDES ET GAZ AU TRAVERS DES BARRIERES GEOSYNTHETIQUES**

RESUME .....	78
--------------	----

### **4 MATERIAIS E METODOLOGIA GERAL**

4.1 MATERIAIS ESTUDADOS .....	81
4.1.1 Geocompostos bentoníticos (GCL).....	81
4.1.2 Geomembrana (GM).....	84
4.1.3 Barreira mineral (CCL).....	84
4.2 METODOLOGIA GERAL .....	85

### **4 MATERIAUX ET METHODOLOGIE GENERALE**

RESUME .....	87
--------------	----

---

## PARTE II

### ESTUDO DO TRANSPORTE DE GASES ATRAVÉS DE GCLs

#### 5 METODOLOGIA DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE GASES ATRAVÉS DE GCLs

5.1 INTRODUÇÃO.....	90
5.2 BASES TEÓRICAS .....	91
5.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE AO GÁS DE GCLs.....	96
5.3.1 Equipamento para ensaio de permeabilidade ao gás de GCLs.....	96
5.3.2 Preparação dos corpos de prova.....	101
5.4 PROGRAMA DE ENSAIOS EXECUTADOS .....	104
5.5 ESTUDO SOBRE AS CONDIÇÕES DO ENSAIO .....	105

#### 5 METHODOLOGIE DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE GAZ AU TRAVERS LES GCLs

RESUME .....	110
--------------	-----

#### 6 RESULTADOS DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE GASES ATRAVÉS DE GCLs

6.1 INTRODUÇÃO.....	112
6.2 INFLUÊNCIA DA HIDRATAÇÃO DO GCL .....	112
6.2.1 Variação da permeabilidade com a umidade gravimétrica .....	112
6.2.2 Variação da permeabilidade com a umidade volumétrica .....	114
6.2.3 Variação da permeabilidade com a quantidade de ar.....	116
6.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FISSURAS POR DESSECAÇÃO DA BENTONITA.....	119
6.4 ESTUDO DA DESSECAÇÃO DO GCL DEVIDO AO FLUXO DE GÁS .....	122
6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	124

#### 6 RESULTATS DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE GAZ AU TRAVERS LES GCLs

RESUME .....	126
--------------	-----

---

## Parte III

### ESTUDO DO TRANSPORTE DE LÍQUIDO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS

#### 7 METODOLOGIA DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE LÍQUIDO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS

7.1 INTRODUÇÃO.....	128
7.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE FLUXO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS .....	129
7.2.1 Equipamento para ensaio de fluxo através de barreiras compostas devido a um dano na geomembrana.....	129
7.2.2 Preparação dos corpos de prova.....	133
7.3 PROGRAMA DE ENSAIOS EXECUTADOS .....	135

#### 7 METHODOLOGIE DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE LIQUIDE AU TRAVERS DES ETANCHEITESCOMPOSITES

RESUME .....	136
--------------	-----

#### 8 RESULTADOS DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE LÍQUIDO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS

8.1 INTRODUÇÃO.....	138
8.2 ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....	139
8.2.1 Redução do fluxo devido à expansão da bentonita.....	139
8.2.2 Influência da dimensão do dano na geomembrana .....	139
8.2.3 Caminhos preferenciais de fluxo através da interface .....	141
8.2.4 Estudo das consequências de sobreposição do dano e costura.....	143
8.2.5 Evolução do teor de umidade das amostras ensaiadas .....	146
8.3 INTERFACE DE CONTATO GM-GCL.....	147
8.3.1 Transmissibilidade da interface.....	147
8.3.2 Condições de contato na interface.....	150
8.4 REPERCUSSÕES NAS CONDIÇÕES DE CAMPO .....	152
8.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	156

## **8 RESULTATS DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE LIQUIDE AU TRAVERS DES ETANCHEITESCOMPOSITES**

RESUME .....	158
--------------	-----

## **9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

9.1 CONCLUSÕES .....	160
9.1.1 Permeabilidade ao gás de GCLs .....	160
9.1.2 Transporte de líquidos através de barreiras compostas.....	162
9.1.3 Comentários finais.....	163
9.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	164

## **9 CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS POUR RECHERCHES FUTURES**

9.1 CONCLUSIONS .....	165
9.1.1 Perméabilité au gaz des GCLs.....	165
9.1.2 Transfert de liquide au travers des étanchéités composites .....	166
9.1.3 Commentaires finales.....	168
9.2 SUGGESTIONS POUR DES RECHERCHES FUTURES .....	168

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....170**

## ***Lista de Tabelas***

---

### **CAPITULO 2**

Tabela 2.1 – Dimensões de danos em função do tipo de dano. ....	19
Tabela 2.2 – Qualidade da superfície subjacente à geomembrana (Rollin et al., 1999).....	20
Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens do uso de GCLs (modificado de Bouazza, 1997). ....	21
Tabela 2.4 – Condutividade hidráulica medida em oedopermeâmetro sob 100 kPa de pressão vertical com diferentes fluidos permeantes (Guyonnet et al., 2009). ....	26

### **CAPITULO 3**

Tabela 3.1 – Equações empíricas de previsão da transmissibilidade da interface. ....	63
Tabela 3.2 – Aproximações lineares das equações empíricas de previsão da transmissibilidade da interface. ....	64
Tabela 3.3 – Equações empíricas disponíveis para o cálculo da vazão através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana (Touze-Foltz et al., 2008). ....	67

### **CAPITULO 4**

Tabela 4.1 – Principais características dos GCLs testados (Guyonnet et al., 2008). ....	82
Tabela 4.2 - Composição mineralógica das bentonitas (Guyonnet et al., 2008). ....	83
Tabela 4.3 – Ensaios executados em cada tipo de GCL. ....	84
Tabela 4.4 - Características do solo da barreira mineral dos ensaios de fluxo de água através de barreiras compostas (Barroso, 2005). ....	85

## **CAPITULO 5**

Tabela 5.1 – Programa de ensaios de permeabilidade ao gás de GCLs.....	105
--	-----

## **CAPÍTULO 6**

Tabela 6.1 – Ensaios de dessecação do GCL em função do fluxo de gás .....	123
---	-----

## **CAPITULO 7**

Tabela 7.1 – Programa de ensaios de fluxo através de barreiras compostas GM-GCL-CCL.	135
--	-----

## **CAPITULO 8**

Tabela 8.1 – Teor de umidade das amostras de GCL ensaiadas.....	147
---	-----

Tabela 8.2 - Transmissibilidade de interface calculada a partir da solução analítica proposta por Touze-Foltz et al. (1999). ....	149
---	-----

Tabela 8.3 – Parâmetros usados no cálculo de $Q$ e $R$ nas dimensões de campo.....	154
--	-----

## ***Lista de Figuras***

---

### **CAPÍTULO 2**

Figura 2.1 - Múltiplas aplicações de geossintéticos em aterros sanitários (Bouazza & Zornberg, 2007). .....	13
Figura 2.2 – Causas de danos em geomembranas (dados de Nosko et al., 1996).....	16
Figura 2.3 – Causas de danos em geomembranas (a) após cobertura com camada granular (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000); (b) sem cobertura (dados de Rollin et al., 1999). .....	17
Figura 2.4 – Localização de danos em geomembranas em aterros sanitários (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000). .....	18
Figura 2.5 – Alguns tipos de GCL disponíveis no mercado (modificado de Koerner, 1994). .....	23
Figura 2.6 - Recomendações do uso de GCLs em barreiras na França (modificado – MEEDDAT, 2009). .....	25
Figura 2.7 – Concepção da micro-estrutura e permeabilidade da argila (a) minerais de argila muito bem dispersos, i.e., bentonita sódica; (b) argila agregada devido à maior atração entre os cristais, i.e., bentonita cálcica (modificado de Hasenpatt, 1988).....	26
Figura 2.8 – Mecanismos de hidratação de bentonitas (a) em pó (b) granular (Vangpaisal & Bouazza, 2004). .....	28
Figura 2.9 – Troca de íons de bentonita sódica para bentonita cálcica (modificado de Jasmund & Lagaly, 1993, citado por Egloffstein, 2001). .....	29
Figura 2.10 – Comparação de permeabilidades entre GCLs à base de bentonita sódica ou cálcica (Egloffstein, 2001). .....	30

### **CAPÍTULO 3**

Figura 3.1 – Célula de permeabilidade ao gás de GCLs (Didier et al., 2000). .....	38
Figura 3.2 – Permeabilidade versus umidade volumétrica para GCL BM (Didier et al., 2000). .....	38
Figura 3.3 - Permeabilidade versus umidade volumétrica para GCL BF (Didier et al., 2000). .....	39

Figura 3.4 – Permeabilidade versus quantidade de ar (Didier et al., 2000).....	39
Figura 3.5 – Célula de permeabilidade ao gás de GCLs (Bouazza & Vangpaisal, 2002). .....	40
Figura 3.6 – Relação entre a permeabilidade intrínseca do GCL e sua umidade volumétrica (Bouazza & Vangpaisal, 2003).....	41
Figura 3.7 – Evolução da vazão de gás em função do tempo para vários diferenciais de pressão de gás: efeito da sobrecarga na pré-hidratação (Bouazza & Vangpaisal, 2003).....	41
Figura 3.8 – Amostras de GCL costurado hidratados (a) com sobrecarga (b) sem sobrecarga (Vangpaisal & Bouazza, 2004).....	42
Figura 3.9 - Efeito do diâmetro do dano na geomembrana no vazamento de gás para GCL com baixo teor de umidade (Bouazza & Vangpaisal, 2006). .....	43
Figura 3.10 – Efeito do diâmetro do dano na geomembrana no vazamento de gás para GCL com alto teor de umidade (Bouazza & Vangpaisal, 2006). .....	43
Figura 3.11 – Permissividade dos GCLs (amostras dessecadas) em função do teor de umidade (Shan & Yao, 2000). .....	44
Figura 3.12 – Variação da permeabilidade intrínseca em ciclos de umedecimento e secagem do GCL (Vangpaisal et al., 2002). .....	45
Figura 3.13 – Variação da vazão com o teor de umidade de GCLs hidratados e deformados (Bouazza & Vangpaisal, 2004). .....	46
Figura 3.14 - Cinética de queda de pressão do gás azoto ao longo do tempo: amostra de GCL com $w = 99,7\%$ (Pitanga, 2007).....	48
Figura 3.15 – Variação da permeabilidade intrínseca com o teor de umidade de amostras de GCL hidratadas em expansão livre (tensão confinante de ensaio de 20 kPa) (Pitanga, 2007). .....	49
Figura 3.16 – Fissuras em GCLs exumados da cobertura do aterro sanitário de Hamburg-Georgswerder (a) GCL agulhado com 3 kg/m <sup>2</sup> de bentonita sódica natural; (b) GCL costurado com 5 kg/m <sup>2</sup> de bentonita cálcica ativada (Melchior, 2002). .....	50
Figura 3.17 – Fluxo de líquido através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana. ....	53
Figura 3.18 –Esquema da barreira composta (GCL e estrato subjacente) casos axi- simétrico e bidimensional (dano circular e dano em ruga, respectivamente) (modificado de Touze-Foltz et al., 1999). .....	54
Figura 3.19 – Carga hidráulica na solo subjacente à geomembrana para o caso axi- simétrico com duas condições de contorno: (a) fluxo zero em $r = R_c$ (b) carga hidráulica específica ( $h_s=0$ ) em $r = R_c$ (Touze-Foltz et al., 1999). .....	55



Figura 3.20 - Carga hidráulica na solo subjacente à geomembrana para o caso bi-dimensional com duas condições de contorno: (a) fluxo zero em $x = X_c$ (b) carga hidráulica específica ( $h_s=0$ ) em $x = X_c$ (Touze-Foltz et al., 1999). ....	59
Figura 3.21 – Transmissibilidade da interface versus condutividade hidráulica do GCL para condições de contato ruim, boa, excelente e GM-GCL (Touze-Foltz & Barroso 2006). ....	64
Figura 3.22 – Equipamento para medida de vazão através de barreira composta GM-GCL (Harpur et al., 1993). ....	70
Figura 3.23 – Equipamento em pequena escala para medida de vazão através da interface GM-GCL (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006). ....	72
Figura 3.24 - Equipamento em escala intermediária para medida de vazão através de barreira composta devido a um dano na GM (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006). ....	73
Figura 3.25 – Ensaio em grande escala para medida de vazão através de barreira composta devido a um dano na GM (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006). ....	73
Figura 3.26 – Evolução da vazão em função do tempo para o GCL 1, amostras pré-hidratadas e não pré-hidratadas (Barroso, 2005). ....	74
Figura 3.27 – Tipos de geomembranas usadas : (a) GM lisa; (b) GM texturizada por jateamento; (c) GM relevos em forma de favos; (d) GM texturizada AR (Barroso et al., 2008). ....	75
Figura 3.28 - Evolução da vazão em função do tempo para geomembranas com texturas diferentes (Barroso et al., 2008). ....	75
Figura 3.29 – Evolução da vazão em função do tempo para diferentes pressões confinantes (Bergamini et al., 2009; Barroso et al., 2010). ....	76

## CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Geocompostos bentoníticos testados: (a) fabricante 1 (GCLs 1.S, 1.C e 1.CA); (b) fabricante 2 (GCLs 2.S e 2.C). ....	83
---	----

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Esquema do permeâmetro de queda de pressão (modificado de Li et al., 2004). ....	91
Figura 5.2 – Célula do permeâmetro de fluxo transiente. ....	97
Figura 5.3 – Detalhe do sistema de aquisição automática de dados. ....	98
Figura 5.4– Permeâmetro de fluxo transiente. ....	99
Figura 5.5 – Detalhe do interior da unidade intermediária. ....	100

Figura 5.6 – Determinação da permeabilidade ao gás a partir do método da queda de pressão: (a) diferenciais de pressão em função do tempo obtidos pelo sistema de aquisição nos ensaios no permeâmetro de fluxo transiente; (b) traçado da curva da Equação 5.21 para obtenção da constante de tempo $\tau$ .....	101
Figura 5.7 – Preparação das amostras de GCL: (a) amostra do GCL com marcações de grid para a determinação da espessura; (b) marcação do corpo de prova nas dimensões do permeâmetro de fluxo transiente; (c) recorte do corpo de prova; (d) amostras retiradas no exterior do corpo de prova para determinação do teor de umidade antes do ensaio; (e) amostras retiradas no interior do corpo de prova, após o ensaio, para determinação do teor de umidade. ....	103
Figura 5.8 – Imersão de amostra de GCL em tanque com 50 mm de coluna d'água. ....	104
Figura 5.9 – Ensaios seqüenciais conduzidos na amostra 1.C a 108 % de umidade (corpo de prova 7) para verificar influência da pressão do ensaio no valor de $\tau$ medido.....	107
Figura 5.10 – Ensaios de repetibilidade com amostra 1.CA com 168% de umidade. ....	109

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Variação da constante de tempo com a umidade gravimétrica. ....	113
Figura 6.2 - Variação da constante de tempo com a umidade volumétrica. ....	116
Figura 6.3 – Proporção aproximada de volumes de sólidos, ar e água nos GCLs de bentonita cálcica natural, cálcica ativada e sódica natural, respectivamente, para um $\tau$ de 10 s. ....	118
Figura 6.4 – Variação da constante de tempo com a quantidade de ar. ....	118
Figura 6.5 – Separação das camadas do GCL para visualização do núcleo de bentonita: corpo de prova 10 (GCL 1.CA com 134% de umidade gravimétrica). ....	120
Figura 6.6 – Bentonita no interior de corpos de prova do GCLs 1.CA mod: (a) corpo de prova 17a apresentando fissuras após ensaio e (b) corpo de prova 17b antes do ensaio, com fissuras seladas manualmente. ....	121
Figura 6.7 – Variação da constante de tempo em função da selagem de fissuras ou adição de bentonita no GCL 1.CA modificado (corpos de prova 17a, 17b e 17c). ....	121
Figura 6.8 – Fissuras observadas após ensaio no corpo de prova 1: GCL 1.S com teor de umidade gravimétrico de 168%. ....	122
Figura 6.9 – Esquema dos ensaios de dessecação do GCL (a) secagem sob gradiente de pressão de 4 kPa durante 3 dias (b) secagem natural depois de 3 dias. ....	123

## **CAPÍTULO 7**

Figura 7.1 – Conjunto do equipamento para ensaio de fluxo através de barreira composta. ....	130
Figura 7.2 – Equipamento de vazamento através de barreiras compostas.....	131
Figura 7.3 – Preparação do cilindro inferior : (a) superfície da argila compactada; (b) GCL instalado sobre a argila compactada .....	132
Figura 7.4 – Grid de definição das sub-amostras para determinação da distribuição da umidade final nos corpos de prova ensaiados.....	134

## **CAPÍTULO 8**

Figura 8.1 – Vazões através de barreiras compostas para um furo de 4 mm na geomembrana. ....	140
Figura 8.2 - Vazão através da barreira composta versus tempo para um furo de 10 mm na geomembrana. ....	140
Figura 8.3 – Caminhos preferenciais de fluxo ao longo das costuras.....	142
Figura 8.4 – Distribuição não uniforme da bentonita no núcleo do GCL 1.C.....	142
Figura 8.5 – Visualização da forma da área molhada dos GCLs após ensaio de transmissibilidade (Touze-Foltz et al., 2002) .....	143
Figura 8.6 - Vazão através da barreira composta versus tempo para furo de 10 mm coincidindo com costura dos GCLs 1.S e 1.C. ....	144
Figura 8.7 – Expansão da bentonita no GCL 1-S: amostra de GCL após o ensaio 1.S-10b - expansão da bentonita selando o furo da geomembrana no ensaio. ....	145
Figura 8.8 –Determinação da distribuição do teor de umidade final no corpo de prova ensaiado: (a) distribuição das sub-amostras no corpo de prova; (b) sub-amostras recortadas (amostra do ensaio 1.C-4).....	147
Figura 8.9 – Transmissibilidade da interface versus condutividade hidráulica do material subjacente.....	151
Figura 8.10 – Vazão versus condutividade hidráulica equivalente nas condições de campo.....	155
Figura 8.11 – Raio da área molhada versus Condutividade hidráulica equivalente nas condições de campo. ....	156

## *Lista de Abreviações*

---

AL	camada de atenuação
ASTM	<i>American Socyety for Testing Materials</i>
C	cálcica (natureza da bentonita)
CA	cálcica ativada (natureza da bentonita)
CCL	camada de argila compactada
GCL	geossintético bentonítico
GM	geomembrana
GTX	geotêxtil
HDPE	polietileno de alta densidade
ISO	<i>International Organisation for Standartization</i>
LLDPE	polietileno linear de baixa densidade
NF	<i>Norme Française</i>
NW	não-tecido
PP	polipropileno
PVC	policloreto de vinila
S	sódica (natureza da bentonita)
W	tecido

## *Lista de Símbolos*

---

$a$	quantidade de ar (relação do volume de ar com o volume total)
$a$	área do dano circular
$A$	área da seção transversal
$b$	½ largura de ruga ou dano longitudinal
$C$	diferença de concentração da fase gasosa
$D_e$	coeficiente de difusão efetivo do gás
$d$	diâmetro médio dos grãos da matriz porosa
$d_{s0}$	espessura do GCL seco sob 0 kPa de pressão vertical
$d_{s20}$	espessura do GCL seco sob 20 kPa de pressão vertical
$d_{GCL}$	espessura do GCL nas condições do ensaio
$d_{h0}$	espessura do GCL hidratado sob 0 kPa de pressão vertical
$d_{h20}$	espessura do GCL hidratado sob 20 kPa de pressão vertical
$dP/dx$	gradiente de pressão
$e$	índice de vazios
$e_B$	“bulk void ratio” (relação entre volume de vazios e volume de sólidos bentonita+geotêxteis)
$F_g$	fluxo difusivo de gás
$h$	carga hidráulica
$h_a$	carga hidráulica no meio da camada permeável
$h_s$	carga hidráulica específica na interface transmissível
$h_w$	carga hidráulica sobre a geomembrana
$H_f$	espessura da fundação
$H_L$	espessura da camada subjacente à geomembrana (CCL ou GCL)

$i_s$	gradiente hidráulico
$I_0, K_0$	funções de Bessel de ordem zero
$I_1, K_1$	funções de Bessel de primeira ordem
$IP$	índice de plasticidade
$k$	permeabilidade intrínseca
$k_{AL}$	condutividade hidráulica da camada de atenuação
$k_{CCL}$	condutividade hidráulica da camada de argila compactada
$k_{EQ}$	condutividade hidráulica equivalente
$k_f$	condutividade hidráulica da fundação
$k_{GCL}$	condutividade hidráulica do geocomposto bentonítico
$k_L$	condutividade hidráulica da camada subjacente à geomembrana
$k_s$	condutividade hidráulica da barreira passiva
$L$	espessura/altura a ser vencida pelo fluxo
$L$	comprimento de dano longitudinal (caso bi-dimensional)
$m_g$	massa de gás permeando
$m_p$	massa de gás perdida
$M_B$	massa seca por unidade de área da bentonita
$M_{GS}$	massa seca por unidade de área do geossintético
$n_g$	porosidade do corpo de prova
$P$	pressão de gás
$P_{atm}$	pressão atmosférica
$P_c$	pressão de gás dentro da câmara
$P_m$	pressão média de gás
$Q$	vazão
$Q_L$	vazão por unidade de comprimento
$Q_r$	vazão na interface transmissível (caso axi-simétrico)
$Q_s$	vazão que infiltra na barreira

$Q_x$	vazão radial na interface transmissível na direção normal ao eixo do dano longitudinal (caso bi-dimensional)
$r_0$	raio do dano na geomembrana
$R$	constante universal dos gases
$R_c$	raio da área molhada (caso axi-simétrico)
$Re$	número de Reynolds
$t$	tempo
$T$	temperatura absoluta (gás)
$v$	velocidade do fluxo
$V$	volume da câmara (ensaio de permeabilidade ao gás)
$w$	umidade gravimétrica
$w_f$	umidade gravimétrica final
$w_i$	umidade gravimétrica inicial
$w_L$	limite de liquidez
$w_{opt}$	umidade ótima
$w_P$	limite de plasticidade
$X_c$	largura virtual da área molhada (caso bi-dimensional)
$Z$	espessura do corpo de prova (ensaio de permeabilidade ao gás)
$\partial C/\partial z$	gradiente de concentração
$\Delta P_c$	diferencial de pressões totais dentro da câmara
$\gamma_d$	densidade seca máxima
$\eta$	viscosidade dinâmica do fluido
$\rho$	massa específica
$\rho_B$	massa específica dos sólidos da bentonita
$\rho_{GS}$	massa específica dos sólidos do geossintético
$\theta$	transmissibilidade
$\tau$	constante de tempo

$\vartheta$	umidade volumétrica
$\omega$	peso molecular médio do gás
$\psi$	permissividade



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

A disposição adequada de resíduos em aterros sanitários visa evitar a contaminação do solo e da atmosfera com produtos da decomposição do lixo, minimizando os impactos ambientais e/ou prejuízos à saúde que seriam causados por uma disposição inadequada desses resíduos. A impermeabilização dos aterros sanitários é, portanto, um requisito primordial para o cumprimento de um dos seus objetivos principais: conter os resíduos evitando tanto quanto possível a contaminação do meio ambiente. Portanto, o fundo, os taludes laterais e a cobertura de aterros sanitários devem ser revestidos com material de baixa permeabilidade.

Tradicionalmente, usa-se a argila compactada (CCL) como barreira de fluidos em obras geotécnicas, visto que ela geralmente apresenta valores relativamente baixos de permeabilidade. No entanto, o uso de geossintéticos, como geomembranas (GM) e geocompostos bentoníticos (GCLs), tem sido crescente nessas obras devido a vantagens como: melhor controle de qualidade dos materiais, facilidade e rapidez de instalação (inclusive menos dependente das condições climáticas se comparada à compactação de argila), aumento do volume útil dentro das células de disposição de resíduos (visto que a espessura desses materiais é bem menor se comparada à espessura da argila compactada), entre outras. Justamente a pequena espessura de geomembranas combinada com os processos construtivos e os materiais em contato as torna suscetíveis a danos mecânicos. Nesse contexto, o reforço da argila compactada com um GCL (formando uma barreira passiva GCL-CCL) se faz necessário em alguns casos, para conter os contaminantes em caso de dano à geomembrana.

Geocompostos bentoníticos, os chamados GCLs, são materiais sintéticos compostos por um núcleo de bentonita em pó ou granular ligado a uma ou mais camadas de geossintético (geralmente geotêxtil ou geomembrana). O geossintético de suporte, a bentonita e o geossintético da cobertura (quando existe) são ligados por adesivamento, agulhagem ou

costura. Quando hidratados e confinados, os GCLs desempenham funções de barreira de gases ou líquidos com seu desempenho dependendo, na maioria das vezes, do grau de hidratação e da condutividade hidráulica da bentonita. Esses materiais são comumente empregados em barreiras de gases na cobertura dos aterros sanitários ou barreira de líquidos no fundo dessas instalações.

Diferentes tipos de GCL são hoje disponibilizados no mercado. Variações no tipo de bentonita, tipo de geossintéticos de suporte e cobertura, bem como o processo de manufatura, multiplicam as opções de produtos disponíveis. Torna-se necessário conhecer, portanto, a diferença de desempenho desses produtos sob as solicitações típicas a que estão submetidos, permitindo conhecer os produtos mais indicados para cada tipo de aplicação.

## **1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DA PESQUISA**

A eficiência dos GCLs como barreira de gases e líquidos foi estudada por diversos autores, o que confirma o interesse no tema. Diversos aspectos dos GCLs em barreiras de gases e líquidos têm sido avaliados na literatura, como o comportamento do material quando submetido a diferentes solicitações, sua compatibilidade com produtos químicos, mudanças de estrutura da bentonita quando submetida a ciclos de hidratação e secagem, eficiência dos GCLs quando submetidos à pré-hidratação ou não, redução da permeabilidade quando uma sobrecarga é aplicada durante a hidratação, entre outros. Aspectos relacionados às características e propriedades dos GCLs também têm sido estudados, como a influência do tipo de bentonita (em pó ou granular), aumento ou redução da transmissibilidade da interface com a geomembrana em função do tipo de geotêxtil de cobertura do GCL, influência do processo de manufatura do GCL no seu desempenho etc.

As bentonitas, principal componente dos GCLs, podem ser classificadas como sódicas naturais, cálcicas ativadas ou cálcicas naturais, em função do cátion mais presente entre as camadas de silicato do argilomineral. As propriedades de estanqueidade das bentonitas variam em função da sua natureza. Estudos precedentes indicam que a condutividade hidráulica de GCLs a base de bentonita cálcica natural é geralmente maior do que a de GCLs a base de bentonitas sódica natural ou cálcica ativada. Esses resultados despertaram o interesse em investigar a influência da natureza da bentonita no fluxo de gases através de GCLs e também no fluxo de líquidos através de barreiras compostas envolvendo GCLs.

Os objetivos desse trabalho são, portanto: (i) estudar a permeabilidade ao gás de diferentes tipos de GCLs em condições típicas de barreiras na cobertura de aterros sanitários e (ii) estudar o transporte de líquidos através de barreiras compostas por geomembranas, GCLs e CCL em condições típicas do fundo dos aterros sanitários, dando ênfase à importância da natureza da bentonita no desempenho dos GCLs como barreira. Espera-se obter resultados que esclareçam se a natureza da bentonita e outras características dos GCLs estudados têm ou não uma importância significativa no seu desempenho.

### **1.3 ESTRUTURA DA TESE**

A tese está organizada em nove capítulos escritos em português seguidos de resumos em francês. O primeiro e o último capítulos apresentam a introdução e as conclusões da tese respectivamente. Os capítulos 2 a 8 foram divididos em 3 partes. A Parte I contém a revisão bibliográfica (Capítulos 2 e 3) e a apresentação dos materiais usados da pesquisa (Capítulo 4). A Parte II descreve o primeiro estudo proposto nos objetivos, sobre o fluxo de gases através de GCL. Dentro dessa parte, o Capítulo 5 apresenta a metodologia do estudo e o Capítulo 6 apresenta os resultados e conclusões obtidos desse estudo. A Parte III descreve o segundo estudo proposto nos objetivos, sobre o transporte de líquido através de barreiras compostas do tipo GM-GCL-CCL. Assim como na Parte II, primeiramente é apresentada a metodologia do estudo (Capítulo 7) e em seguida os resultados e conclusões desse segundo estudo (Capítulo 8). O Capítulo 9 corresponde às conclusões gerais da tese e sugestões para pesquisas futuras. A seguir são sumariados os conteúdos de cada capítulo da tese.

O presente capítulo é uma introdução ao tema estudado na tese abrangendo o contexto geral do estudo, a motivação da tese e seus objetivos, como forma de justificar a importância da mesma.

#### ***Parte I***

Após o Capítulo 1 de introdução, o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os geossintéticos utilizados como barreiras de gases e líquidos em aterros sanitários. São apresentadas as definições de geomembranas e de GCLs bem como suas principais características. É feita uma abordagem sobre as situações críticas que podem comprometer o

bom desempenho de barreiras geossintéticas simples ou compostas, seja na cobertura ou no fundo de aterros sanitários.

O Capítulo 3 consiste em uma segunda parte de revisão bibliográfica onde são apresentados mais especificamente os estudos anteriores sobre o vazamento de gases na cobertura de aterros sanitários (item 3.1) e sobre o vazamento de líquidos no fundo dos aterros sanitários (item 3.2). Os estudos apresentados abrangem bases teóricas sobre o transporte de fluidos através de meios porosos, ensaios de laboratório simulando as condições típicas de aterros sanitários e soluções analíticas necessárias para o entendimento do transporte de gases e líquidos através dessas barreiras. São sumariados os resultados obtidos nas pesquisas anteriores que servem de comparação para os resultados da presente pesquisa.

O Capítulo 4 descreve as propriedades e características relevantes dos materiais selecionados para o estudo: GCL, geomembrana e solo para compor a CCL, bem como a justificativa das escolhas. A metodologia geral da pesquisa é sumariada no final do Capítulo 4. A metodologia específica de cada ensaio só foi descrita nos capítulos correspondentes aos estudos do transporte de gases (Parte II) ou líquidos (Parte III) através de barreiras geossintéticas.

## ***Parte II - Estudo do transporte de gases através de GCLs***

O Capítulo 5 apresenta a metodologia dos ensaios de permeabilidade ao gás de GCLs. Primeiramente, são apresentadas uma introdução e as bases teóricas do ensaio, que foi recentemente proposto como alternativa a ensaios tradicionais (itens 5.1 e 5.2). Em seguida, é feita a descrição detalhada da metodologia dos ensaios executados (item 5.3), englobando a descrição do equipamento usado e o método de preparação dos corpos de prova. O item 5.4 apresenta o programa de ensaios executados. Um estudo sobre as condições dos ensaios é apresentado no item 5.5.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos e as conclusões da do primeiro estudo (Parte II). Depois de uma breve introdução (item 6.1), dos itens 6.2 a 6.4 é feita a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios, abordando a influência de diferentes fatores na permeabilidade ao gás de GCLs. No item 6.5 é apresentada a discussão dos resultados obtidos do estudo do fluxo de gases através de GCLs correspondente à Parte II.

### ***Parte III - Estudo do transporte de líquidos através de barreiras compostas***

No Capítulo 7 é feita primeiramente uma introdução a respeito das características dos GCLs que podem influenciar o vazamento líquido através de barreiras compostas (item 7.1). Em seguida é feita a descrição detalhada da metodologia dos ensaios executados (item 7.2), abrangendo a descrição do equipamento do ensaio e o método de preparação dos corpos de prova. O item 7.3 apresenta o programa de ensaios executados.

Os resultados dos ensaios de fluxo de líquido através de barreiras compostas são apresentados no Capítulo 8. Primeiramente, no item 8.1, é feita uma breve introdução do capítulo. Em seguida (item 8.2), são apresentados os resultados dos ensaios abordando os diversos fatores que afetam o fluxo através da barreira composta. No item 8.3 são calculadas as transmissibilidades das interfaces GM-GCL (por meio das soluções analíticas apresentadas no Capítulo 3). Com os valores de transmissibilidade obtidos é feita uma análise do desempenho de barreiras compostas nas condições de campo (item 8.4). As discussões dos resultados obtidos no estudo do transporte de líquidos através de barreiras geossintéticas (Parte III) são apresentadas no item 8.5.

O Capítulo 9 destaca as principais conclusões obtidas nos dois estudos conduzidos no presente trabalho (Partes II e III) e apresenta algumas sugestões para pesquisas futuras.

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Le stockage approprié des déchets dans des Installations de Stockage de Déchets (ISD) vise à éviter la contamination du sol et de l'atmosphère avec des polluants produits par la décomposition des déchets, en limitant les impacts environnementaux et/ou les préjudices à la santé qui seraient causés par une disposition inappropriée de ces déchets. L'imperméabilisation des ISD est donc une condition primordiale pour l'accomplissement de ces objectifs. Pour cette raison, le fond, les côtés et la couverture des ISD doivent être recouverts avec des matériaux étanches ou de très faible perméabilité.

Traditionnellement, on utilise l'argile compactée (CCL) comme barrière étanche contre l'écoulement de fluides dans les ouvrages géotechniques. Cependant, l'utilisation des géosynthétiques, comme les geomembranes (GM) et les geosynthétiques bentonitiques (GSB) augmente dans ces ouvrages à cause de certains de leurs avantages : meilleur contrôle de la qualité des matériaux, facilité et rapidité de la mise en place (y compris moins dépendante des conditions climatiques que la construction d'une couche d'argile compactée), augmentation du volume utile dans les ISD (vu que les géosynthétiques sont moins épais qu'une couche d'argile compactée), etc. Leur inconvénient est lié à leur faible épaisseur conduisant à une plus forte susceptibilité aux endommagements mécaniques, ce qui est aggravé par les méthodes constructives et les matériaux normalement en contact avec la geomembrane (ex : granulats de drainage). Dans ce contexte, il devient nécessaire de contenir les polluants au cas où la geomembrane soit endommagée par la combinaison : CCL-GM ou CCL-GCL.

Les géocomposites bentonitiques, les GCL, sont des matériaux synthétiques composés par une couche de bentonite en poudre ou en granulés, liée à un ou plusieurs géosynthétiques (normalement géotextile ou geomembrane). Le géosynthétiques de support, la bentonite et le géotextile de couverture (quand il existe) sont liées par collage, couture ou aiguilletage. Lorsque le GCL est hydraté et confiné, il remplit la fonction de barrière vis-à-vis des gaz et

des liquides. Sa performance dépend normalement de l'hydratation et de la conductivité hydraulique de la bentonite. Les GCL sont souvent installés comme compléments de barrières de gaz dans la couverture des ISD et barrière de liquides au fond des ISD.

Actuellement, plusieurs types de GCL sont disponibles sur le marché. Les types de bentonite, de géosynthétiques de support et couverture ainsi que le procédé de fabrication multiplient les options de produits disponibles. Il est donc important de connaître les différences de performance de ces produits sous conditions réelles dans les ouvrages où ils seront installés, ce qui permet de choisir les produits les plus indiqués pour chaque application.

## **1.2 MOTIVATION ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE**

L'efficacité des GCLs en tant que barrières de gaz et liquides a été étudiée par plusieurs auteurs, ce qui confirme l'intérêt pour ce matériau. Ces études concernent le comportement du matériau lorsque soumis à certaines sollicitations, la compatibilité avec des produits chimiques, le changement de la structure de la bentonite lorsque soumise à cycles d'hydratation et séchage, l'efficacité des GCL pré-hydratés ou non pré-hydratés, la réduction de la perméabilité lorsque le GCL est pré-hydraté sous une contrainte mécanique, entre autres. Des aspects liés aux caractéristiques et propriétés des GCLs ont été également étudiés, comme l'influence du type de bentonite (en poudre ou en granulés), l'augmentation ou réduction de la transmissibilité de l'interface GM-GCL en fonction du type de géotextile (tissé ou non-tissé) en contact avec la géomembrane, l'influence du procédé de fabrication sur sa performance, etc.

Concernant la nature de la bentonite, on distingue les bentonites sodiques naturelles, calciques activées et calciques naturelles, en fonction du cation interfoliaire majoritairement présent. Les propriétés d'étanchéité des bentonites varient en fonction de sa nature. Des études précédentes indiquent que la conductivité hydraulique des GCLs à base de bentonites calcique naturelle est supérieure à celle des GCLs à base de bentonite sodique naturelle ou calcique activée. Ces résultats montrent l'intérêt d'étudier l'influence de la nature de la bentonite sur l'écoulement de gaz au travers des GCLs et aussi sur l'écoulement de liquides au travers des étanchéités composites contenant un GCL.

Les objectifs de cette thèse sont, donc : (i) étudier la perméabilité au gaz de différents types de GCL sous conditions typiques des couvertures de ISD et (ii) étudier le transfert de liquides au

travers des étanchéités composites GM-GCL-CCL sous conditions typiques du fond des ISD, en considérant en priorité l'influence de la nature de la bentonite sur les performances des GCLs en tant que barrière étanche. On cherche à obtenir des résultats qui permettent de mieux voir si la nature de la bentonite des GCLs étudiés a une importance significative sur ses performances.

### **1.3 ORGANISATION DE LA THESE**

La thèse est organisée en neuf chapitres écrits en portugais suivi de résumés en français. Le premier et le dernier chapitres sont respectivement l'introduction et les conclusions de la thèse. Les chapitres 2 à 8 sont partagés en trois parties. La Partie I contient l'étude bibliographique (Chapitres 2 et 3) et la présentation des matériaux utilisés dans l'étude (Chapitre 4). La Partie II décrit la première étude proposée dans les objectifs, concernant le transfert de gaz au travers des GCLs : le Chapitre 5 présente la méthodologie de l'étude et le Chapitre 6, les résultats et les conclusions obtenus de cette étude. La Partie III décrit la deuxième étude, sur le transfert de liquides au travers des étanchéités composites GM-GCL-CCL : le Chapitre 7 présente la méthodologie et le Chapitre 8 présente les résultats et les conclusions de cette étude. Le Chapitre 9 correspond aux conclusions générales de la thèse. Les contenus de chaque chapitre du mémoire sont décrits ci-après :

#### ***Partie I***

Après le Chapitre 1 d'introduction, le Chapitre 2 présente l'étude bibliographique sur les géosynthétiques utilisés comme barrières de gaz et liquides en ISD. Les définitions des géomembrane et GCLs sont présentées ainsi que leurs caractéristiques principales. Sont présentées également les situations critiques qui peuvent compromettre l'efficacité des barrières géosynthétiques simples ou des étanchéités composites, en couverture ou au fond des ISDs.

Le Chapitre 3 est une deuxième partie de l'étude bibliographique où on présente plus spécifiquement les études précédentes sur le flux de gaz au travers de la couverture des ISDs (item 3.1) et sur l'écoulement de liquides au fond des ISDs (item 3.2). Les études présentées comprennent les bases théoriques sur le transfert de fluides au travers des milieux poreux, les essais de laboratoire qui simulent les conditions typiques sur site et les solutions analytiques



nécessaires pour la compréhension du transfert de gaz et liquides au travers de ces barrières. Les résultats des études précédentes sont résumés pour permettre la comparaison avec les résultats de cette recherche.

Le Chapitre 4 décrit les propriétés et caractéristiques les plus importantes des matériaux sélectionnés pour cette étude : GCL, geomembrane et argile utilisé pour la barrière CCL, ainsi que les justifications des choix de ces matériaux. La méthodologie générale de la recherche est résumée à la fin du Chapitre 4. Les méthodes spécifiques pour chaque essai ont été décrites dans les chapitres correspondants aux études du transfert de gaz (Partie II) ou transfert de liquide (Partie III) au travers les barrières géosynthétiques.

### ***Partie II – Étude du transfert de gaz au travers des GCLs***

Le Chapitre 5 présente le principe des essais de perméabilité aux gaz des GCLs. On présente une introduction et les bases théoriques d'un nouvel essai proposé récemment comme alternative aux essais traditionnels (items 5.1 et 5.2). La méthodologie de l'essai est ensuite détaillée, avec le programme d'essais exécutés, la méthode de préparation des échantillons, et la description de l'équipement utilisé (item 5.3). Le programme d'essais est présenté dans l'item 5.4 et une étude des conditions des essais est présentée dans l'item 5.5.

Le Chapitre 6 présente les résultats obtenus et les conclusions de la première étude (Partie II). Les items 6.1 à 6.4 présentent les résultats des essais obtenus avec une étude de l'influence de différents facteurs sur la perméabilité aux gaz des GCLs. L'item 6.5 présente la conclusion de cette étude de la Partie II.

### ***Partie III – Étude du transfert de liquide au travers des étanchéités composites***

Dans le chapitre 7, on présente d'abord les caractéristiques des GCLs qui peuvent influencer l'écoulement de liquide au travers des étanchéités composites (item 7.1) avant de décrire précisément la méthodologie des essais (item 7.2), incluant la méthode de préparation des échantillons et la description de l'équipement. Le programme d'essais est présenté dans l'item 7.3.

Les résultats des essais de transfert de liquide au travers des étanchéités composites sont présentées dans le Chapitre 8. Dans l'item 8.1 on présente une introduction. Dans l'item 8.2

on présente les différents facteurs qui affectent l'écoulement au travers de l'étanchéité composite. Les valeurs de transmissivité de l'interface GM-GCL obtenues (en utilisant les solutions analytiques présentées dans le Chapitre 3) sont ensuite présentées dans l'item 8.3. Une étude sur les conséquences des valeurs de transmissivité dans les conditions typiques des ISDs est décrite dans l'item 8.4. Les conclusions de l'étude du transfert de liquide au travers des étanchéités composites (Partie III) est présenté dans l'item 8.5.

Le Chapitre 9 expose les principales conclusions obtenues à partir des deux études menées au cours de la thèse (décrites dans les Parties II et III) et présente des suggestions pour des recherches futures.

# ***PARTE I***

<b><i>Capítulo 2</i></b>	<b>12</b>
<i>Geossintéticos como barreira em aterros sanitários</i>	

<b><i>Capítulo 3</i></b>	<b>33</b>
<i>Transporte de líquidos e gases através de barreiras geossintéticas</i>	

<b><i>Capítulo 4</i></b>	<b>80</b>
<i>Materiais e metodologia geral</i>	

### 2 GEOSSINTÉTICOS COMO BARREIRAS EM ATERROS SANITÁRIOS

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a utilização de geossintéticos para impermeabilização no fundo e na cobertura de aterros sanitários, condições sob as quais os geossintéticos serão estudados na presente pesquisa. São definidos os materiais geossintéticos que podem cumprir a função impermeabilizante - geomembranas (GM) e geocompostos bentoníticos (GCL) - com a apresentação das principais propriedades que garantem a estanqueidade desses materiais. Os principais problemas que podem comprometer o desempenho de GM e GCL em condições típicas da cobertura e fundo de aterros sanitários são descritos. Dentro do contexto geral da tese, a apresentação das propriedades dos materiais e os problemas que podem acarretar falhas na impermeabilização são elementos chave que justificam a escolha dos materiais testados e das condições dos ensaios de laboratório, buscando aproximar as condições testadas às condições encontradas no campo.

#### 2.1 INTRODUÇÃO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define os aterros sanitários como sendo a técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

Os geossintéticos vêm sendo usados em aterros sanitários com funções diversas: geogrelhas podem ser usadas no reforço dos taludes, geotêxteis são usados como filtro no revestimento do fundo do aterro e entre as camadas de compactação dos resíduos, georredes e geotubos são usados na drenagem do chorume, geocompostos bentoníticos (GCLs) e geomembranas são usados na impermeabilização do fundo e na cobertura de aterros sanitários (Figura 2.1). Estes e outros materiais geossintéticos podem ser empregados em aterros sanitários e obras

ambientais desempenhando diversas funções. Este trabalho se concentra na utilização de geossintéticos em barreiras de líquidos e gases em obras de aterros sanitários.

No fundo de aterros sanitários, uma barreira evita a contaminação do solo e do lençol freático devido ao fluxo difusivo ou advectivo dos poluentes. É geralmente necessário o projeto de barreira que contenha e direcione o líquido resultante da decomposição dos resíduos, impedindo que este acumule sobre a camada impermeável aumentando a carga hidráulica sobre a mesma e/ou atinja as camadas subjacentes devido a falhas na barreira. Os componentes do revestimento de fundo em aterros sanitários são, do topo para o fundo: camada de transição/filtração, camada drenante, camada de proteção e barreira impermeável (Manassero et al., 2000). No caso de uma barreira composta, a geomembrana atua como a primeira resistência ao fluxo advectivo, sendo chamada de barreira ativa. O GCL, e/ou CCL subjacente à geomembrana, atuam como redutores de vazamento no caso de dano na geomembrana, sendo chamados de barreira passiva. Na cobertura de aterros sanitários, um sistema semelhante é necessário para barrar e direcionar, de forma apropriada, os gases produzidos pela decomposição do lixo. A cobertura do aterro sanitário tem também como objetivo barrar a infiltração de água de chuva para o interior do aterro, o que aumentaria o volume de chorume e a carga hidráulica no fundo do aterro sanitário.

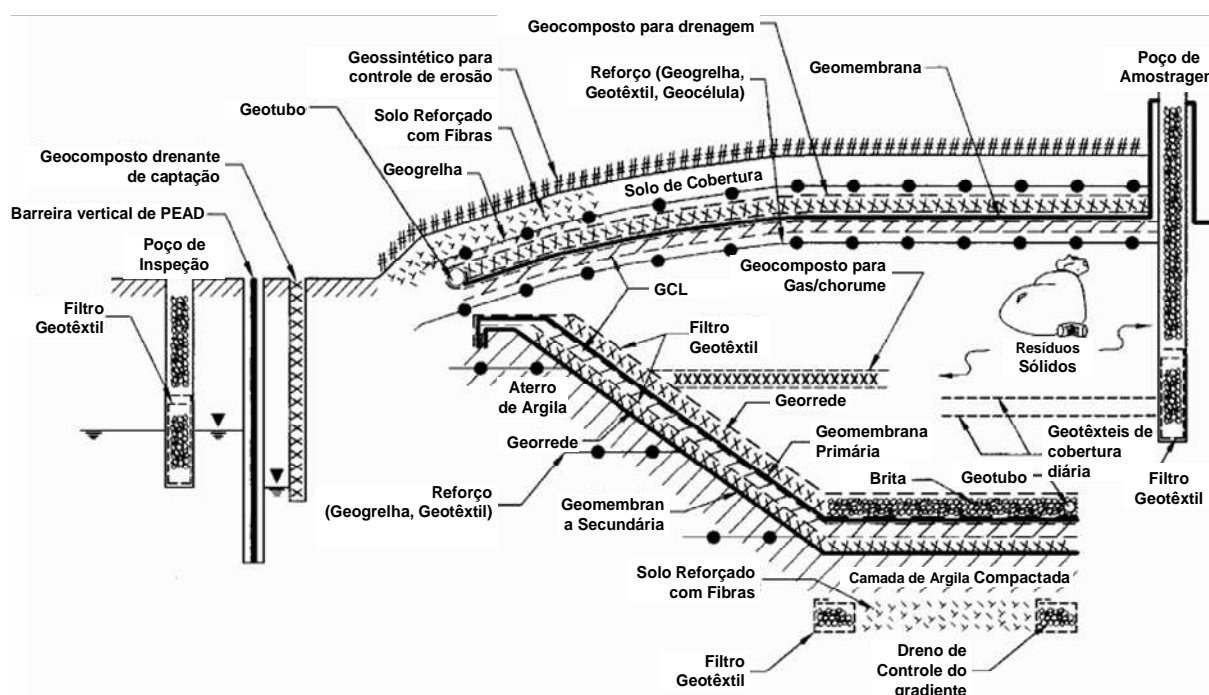


Figura 2.1 - Múltiplas aplicações de geossintéticos em aterros sanitários (Bouazza & Zornberg, 2007).

Os geossintéticos que podem cumprir a função de barreira de líquidos e gases são as geomembranas (GM) e os geossintéticos bentoníticos (GCLs). De acordo com Rowe (1998), as preocupações principais no projeto de barreiras de materiais geossintéticos são o transporte de contaminantes (difusivo ou advectivo), a vida útil dos materiais empregados, problemas geotécnicos (como estabilidade de taludes e recalques diferenciais, entre outros) e a atenuação de contaminantes (sorção, biodegradação e diluição). O presente trabalho foca no estudo do transporte de contaminantes através de barreiras geossintéticas.

A caracterização do fluxo de líquidos ou gases em barreiras compostas por geomembranas e/ou GCLs, submetidos a condições típicas de obras, é importante para quantificar os vazamentos devido a danos nos materiais que compõem a barreira, testar configurações e materiais que permitam minimizar os vazamentos e, finalmente, verificar os limites de solicitação para o qual a barreira mantém uma eficiência aceitável. Neste trabalho serão apresentados estudos sobre a eficiência de GCLs em barreiras para gases ou líquidos, verificando seu comportamento em condições típicas de obras de aterros sanitários. Ênfase será dada à influência das características do GCL (tipo de bentonita e modo de fabricação) usado na cobertura ou no fundo dos aterros sanitários. Antes de apresentar os estudos na literatura sobre o vazamento de líquidos e gases através de barreiras compostas de um ou mais geossintéticos (no Capítulo 3), uma breve revisão a respeito de geossintéticos utilizados nessas aplicações será apresentada nos itens 2.2 e 2.3, respectivamente.

## **2.2 GEOMEMBRANAS**

### **2.2.1 DEFINIÇÃO**

Segundo a definição da *International Geosynthetic Society*, geomembranas são mantas contínuas e flexíveis constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Elas possuem baixíssima permeabilidade e são usadas como barreiras para fluidos, gases ou vapores (Bathurst, 2007).

A ASTM ISO 10318 chama a geomembrana de “barreira geossintética polimérica” e a define como uma estrutura plana manufaturada feita de materiais geossintéticos que servem como um revestimento impermeável. O efeito impermeável é atingido principalmente pelos polímeros. São usadas em aplicações geotécnicas e em construções em contato direto com o solo e/ou outros materiais.

As geomembranas podem ser compostas de materiais poliméricos ou betuminosos. Geomembranas betuminosas têm sido usadas na cobertura de aterros sanitários como alternativa à camada de argila compactada. Esse tipo de geomembrana é menos susceptível a fissuras por dessecação, o que torna seu uso interessante especialmente em cobertura de aterros sanitários ou outras instalações em regiões áridas. (Koerner & Daniel, 1997). Atualmente, os materiais poliméricos mais empregados na fabricação de geomembranas para aplicação em obras hidráulicas são policloreto de vinila, PVC, polipropileno, PP, polietileno de alta densidade, HDPE, e o polietileno linear de baixa densidade, LLDPE (Colmanetti, 2006). Giroud & Touze-Foltz (2003) apontam que as geomembranas mais usadas no fundo de aterros sanitários, são as de HDPE. A preferência por esse tipo de geomembrana se deve especialmente à maior experiência adquirida na aplicação desses materiais e à sua resistência química. Zanzinger & Gartung (2002) comentam que apesar de o sistema de certificação da Alemanha permitir o uso de geomembranas compostas de outros polímeros, os 20 anos de experiência no uso de geomembranas de HDPE em obras de engenharia civil justificam a preferência por esses materiais. Poucos autores (Imaizumi et al., 2006; Kotake et al., 2006; Potié et al., 1997) reportam sobre o uso de geomembranas compostas de outros polímeros no fundo de aterros sanitários no Japão e na França. Engenheiros e pesquisadores reconhecem que a utilização de geomembranas que não as manufaturadas de HDPE no fundo de aterros sanitários só será recorrente quando estiver provado que outros tipos de geomembranas apresentam as propriedades requeridas para um bom desempenho (Touze-Foltz et al., 2008).

O revestimento de fundo em aterros sanitários modernos inclui um sistema de coleta de chorume que tem como função (i) controlar a carga hidráulica atuante sobre a barreira impermeável e (ii) coletar e remover o líquido (Bouazza et al., 2002b). Esse sistema de coleta geralmente é composto por um filtro geotêxtil, uma camada granular ou uma georrede atuando como lençol drenante e geotubos (tubos perfurados para a coleta do chorume). A camada granular associada a pequena espessura da geomembrana e a altas pressões confinantes esperadas em aterros sanitários resultaria no puncionamento dessa última resultando no vazamento de líquido através da barreira, objeto de um dos estudos da presente pesquisa (estudo apresentado na Parte III). Outros problemas também podem comprometer a estanqueidade de geomembranas como as falhas em soldas entre painéis e em encontros com outras estruturas. O estudo do vazamento de líquido através dessas falhas exige uma metodologia de trabalho diferente, que foge do escopo da presente pesquisa.

Mesmo em obras onde são empregados o controle de qualidade da construção (CQC) e a garantia da qualidade da construção (CQA), as geomembranas estão sujeitas a estes danos mecânicos (Bouazza et al., 2002b), que podem prejudicar seu desempenho como barreira. O estudo sobre danos mecânicos tipicamente encontrados em geomembranas é apresentado a seguir. A pesquisa sobre causas, tipo, dimensões de danos em geomembranas visa sustentar a escolha dos danos a que as geomembranas serão submetidas nos ensaios de fluxo de líquido através de barreiras compostas (estudo apresentado na Parte III dessa tese).

## 2.2.2 DANOS MECÂNICOS

### *Causas de danos*

A pequena espessura da geomembrana, associada aos materiais protuberantes com os quais ela pode estar em contato, tráfego de equipamentos, processos de instalação, queda de ferramentas entre outros, a torna suscetível a danos mecânicos. Além desses danos mecânicos, falhas nas soldagens podem igualmente prejudicar o desempenho da geomembrana como barreira em obras.

Nosko et al. (1996) reportaram que 73% dos danos mecânicos são causados durante a instalação da camada sobrejacente à geomembrana, 24% são danos correspondentes à fase de instalação da própria geomembrana e apenas 3% dos danos são causados após o período construtivo (Figura 2.2).

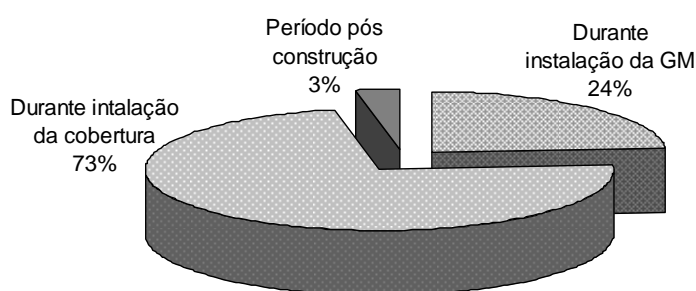


Figura 2.2 – Causas de danos em geomembranas (dados de Nosko et al., 1996).

Dos danos detectados em geomembranas com cobertura de material granular, a maioria deles parece ser provocada durante a instalação da primeira camada de coleta de chorume. Nosko & Touze-Foltz (2000) verificaram que 71% dos danos em geomembranas com cobertura drenante são causados pelo material granular durante a sua instalação, 16% dos danos são



causados por equipamentos pesados, 6% correspondem a falhas em soldas, 6% causadas pelos operários e 1% são cortes (Figura 2.3a).

No caso de geomembranas sem cobertura de material granular, as causas dos danos são diferentes, como reportado por Rollin et al. (1999). Em medições feitas em reservatórios, lagoas e aterros com a geomembrana ainda exposta, os autores verificaram que 55% dos danos eram relacionados a soldas, 25% eram perfurações causadas pela má qualidade de contato com o material subjacente e 20% correspondiam a cortes (Figura 2.3b). Em outro estudo, Peggs (2001) verificou que a maioria dos danos era devida à punção provocada pelos materiais subjacentes à geomembrana, diferente do verificado por Rollin et al. (1999). Por se tratar de uma investigação em uma obra específica, os dados de Peggs (2001) mostram que a ocorrência de danos pode estar condicionada a alguma característica singular da obra, e comparações com dados da literatura baseados em obras de características diferentes pode não ser adequada.

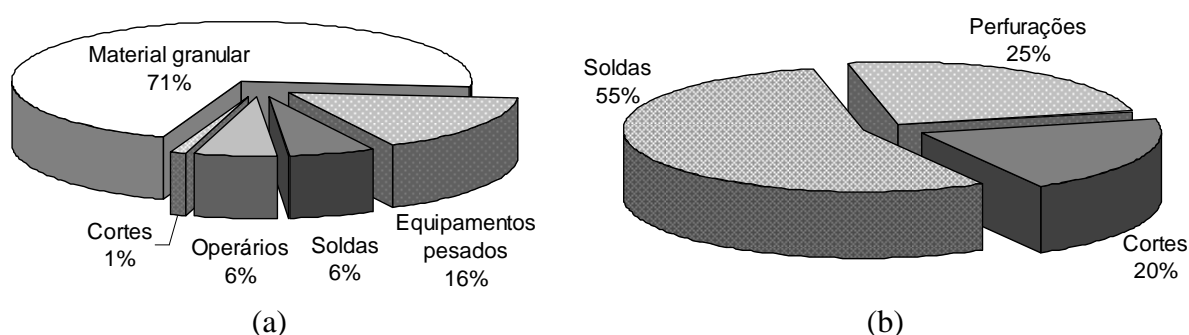


Figura 2.3 – Causas de danos em geomembranas (a) após cobertura com camada granular (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000); (b) sem cobertura (dados de Rollin et al., 1999).

### ***Localização dos danos***

Rollin et al. (2002) agrupou os dados de pesquisas publicadas por Colucci & Lavagnolo (1995), Darilek et al. (1989), Laine & Darilek (1993) e Rollin et al. (1999), sobre danos mecânicos identificados em um total de mais de 1,5 milhões de m<sup>2</sup> de área estudada (em mais de 150 obras inspecionadas). Em reservatórios ou lagoas, 65% dos vazamentos localizados foram decorrentes de falhas em soldas, particularmente nas proximidades do encontro com tubulações ou em remendos. Cortes decorrentes da queda de materiais cortantes foram encontrados nas proximidades dos cantos, reparos com soldas, remendos, etc. Os 35% restantes foram vazamentos encontrados ao longo da geomembrana.

Em aterros sanitários, Nosko & Touze-Foltz (2000) reportaram que a maioria dos danos, 78%, foram detectados na parte plana da geomembrana, 9% foram detectados nas extremidades e cantos, 4% sob tubos, 2% nas proximidades da penetração de tubulações e 7% nas rotas e encontros com estruturas (Figura 2.4).

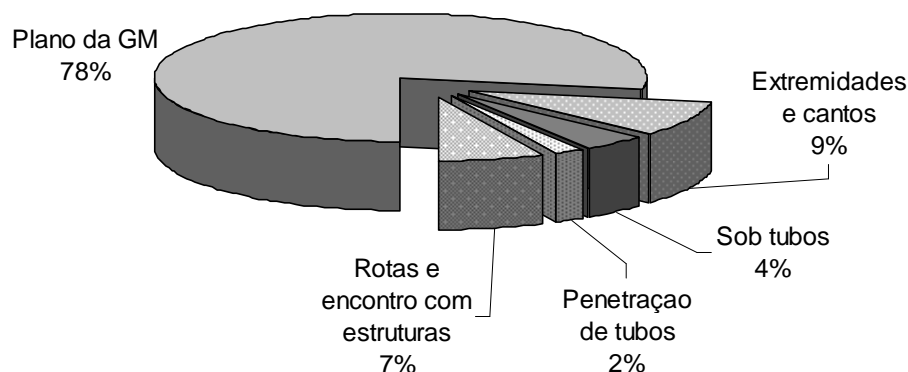


Figura 2.4 – Localização de danos em geomembranas em aterros sanitários (dados de Nosko & Touze-Foltz, 2000).

### ***Tipo e dimensão dos danos***

Collucci & Lavagnolo (1995) estudaram 25 obras e verificaram que aproximadamente 80% dos danos são menores que 500 mm<sup>2</sup>. Laine (1991) analisou os furos nas soldas das geomembranas. O autor reportou uma densidade de 5 danos/ha com dimensões variando de 0,5 a 1 mm. Nosko & Touze-Foltz (2000) verificaram que os danos mecânicos relacionados com o tamanho dos grãos dos materiais sobrejacentes à geomembrana têm, em geral, área de 50 a 200 mm<sup>2</sup>. Os danos relacionados ao tráfego de equipamentos pesados geralmente são maiores que 1000 mm<sup>2</sup>, os danos relacionados a defeitos nas soldas são menores que 50 mm<sup>2</sup> e os relacionados a cortes têm tipicamente de 50 mm<sup>2</sup> a 200 mm<sup>2</sup>. Os dados dessas e outras pesquisas sobre o tipo e dimensão de danos verificados em geomembranas estão sumariados na Tabela 2.1.

Baseando no tipo e dimensão dos danos na geomembrana mais recorrentes nas obras, os ensaios executados na presente pesquisa simulando a barreira composta no fundo de aterros sanitários (estudo apresentado na Parte III) utilizaram o dano circular com 4 mm ou 10 mm de diâmetro, o que corresponde às áreas de 158 mm<sup>2</sup> e 314 mm<sup>2</sup>, respectivamente, que condizem com as dimensões dos danos causados pela intrusão de material granular sobrejacente à geomembrana. Como se verifica na Figura 2.3a, esta é a causa de dano mais

recorrente em geomembranas com cobertura de material granular (camada drenante em aterros sanitários).

Tabela 2.1 – Dimensões de danos em função do tipo de dano.

Autores	Dimensão do dano (mm <sup>2</sup> )	Furos	Rasgos	Cortes	Soldas	Área estudada (ha)
Colucci & Lavagnolo (1995)	0-20	44	31	12	11	27,6
	20-100	37	49	21	4	
	100-500	60	49	2	8	
	500-1000	22	11	0	4	
	1000-10000	10	22	0	1	
	> 10000	15	9	0	0	
Rollin et al. (1999)	< 2	3	-	0	18	24,1
	2-10	6	-	4	7	
	> 10	3	-	6	2	
Nosko & Touze-Foltz (2000)	< 50	332	-	5	115	325
	50-200	1720	236	36	105	
	200-1000	843	153	18	30	
	> 1000	90	496	-	15	
Phaneuf & Peggs (2001)*	< 1 mm	10	0	4	2	63,4
	2-10 mm	28	9	7	5	
	11-50 mm	7	2	21	3	
	51-100 mm	0	1	5	3	
	101-500 mm	1	0	2	1	
	501-1000 mm	0	0	0	3	
	> 1000 mm	0	0	2	2	
	Desconhecido	4	1	5	3	

\* Dimensão do dano expressa em unidade de comprimento ao invés de área.

### 2.2.3 PROTEÇÃO CONTRA DANOS MECÂNICOS

Rollin et al. (1999) associaram a quantidade de danos observados nas geomembranas em obras reais a diversos fatores, dentre eles a qualidade da superfície do solo subjacente à geomembrana, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Qualidade da superfície subjacente à geomembrana (Rollin et al., 1999).

Qualidade	Materiais
Alta	Argila
Alta	Material granular 0–5 mm
Alta	Material granular 0–25 mm com bom geotêxtil de proteção
Média	Material granular 0–25 mm sem bom geotêxtil de proteção
Baixa	Material granular com partículas > 25 mm sem geotêxtil de proteção

Apesar de o uso de geotêxteis na interface entre a geomembrana e o material subjacente melhorar a qualidade de contato na interface entre os materiais, geotêxteis são materiais drenantes, o que pode aumentar o vazamento no caso de dano na geomembrana. Esse assunto foi investigado por diversas pesquisas, conduzidas no sentido de verificar se a utilização de geotêxteis subjacentes à geomembrana poderia contribuir para aumentar o fluxo no caso de dano. Os trabalhos de Fukuoka (1986), Brown et al. (1987), Giroud & Bonaparte (1989a; b), Giroud (1997), Touze-Foltz (2002) e Cartaud & Touze-Foltz (2004) são exemplos de pesquisas conduzidas nesse sentido. Devido ao risco de aumento do fluxo através de um geotêxtil subjacente em caso de dano na geomembrana, o uso de geocompostos bentoníticos, GCLs, tem sido difundido como uma opção para redução de vazamentos, uma vez que, além de melhorar a qualidade de contato na interface, GCLs apresentam baixíssima condutividade hidráulica quando hidratados. Essas e outras propriedades dos GCLs são apresentadas a seguir.

## 2.3 GEOCOMPOSTOS BENTONÍTICOS (GCL)

### 2.3.1 DEFINIÇÃO

Segundo definição da *International Geosynthetic Society*, os GCLs são geocompostos fabricados com um núcleo de bentonita, geralmente envelopado entre geotêxteis de topo e base ou ligadas por adesivo a uma geomembrana ou a uma única manta de geotêxtil. Os geotêxteis que compõem os GCLs geralmente são costurados ou agulhados através do núcleo argiloso, para aumentar a resistência interna do produto ao cisalhamento (Bathurst, 2007).

A ASTM ISO 10318 chama o GCL de “barreira geossintética argilosa” e o define como estrutura plana manufaturada feita com materiais geossintéticos servindo como um revestimento impermeável. O efeito impermeabilizante é conferido principalmente pela argila. São usados em aplicações geotécnicas e em construções em contato direto com o solo e/ou outros materiais.

Ultimamente, vem crescendo o interesse no uso de GCLs conjuntamente a uma camada de argila compactada (CCL) na cobertura de aterros sanitários, ou como parte de uma barreira composta no fundo desses aterros, por causa da sua baixíssima condutividade hidráulica e baixo custo relativo (Bouazza, 2002). O crescente número de congressos e pesquisas publicadas discutindo o tema, bem como o aumento da confiança dos projetistas e de organismos de regulação, evidenciam o interesse na utilização destes materiais. A Tabela 2.3 sumaria as vantagens e desvantagens do uso de GCLs.

Tabela 2.3 – Vantagens e desvantagens do uso de GCLs (modificado de Bouazza, 1997).

Vantagens	Desvantagens
Rápida instalação / Menor necessidade de especialização / menor custo	Baixa resistência ao cisalhamento da bentonita (no caso de GCLs sem reforço)
Condutividade hidráulica muito baixa quanto instalado adequadamente	GCL podem ser perfurados durante ou após sua instalação
Pode resistir a grandes recalques diferenciais	Possível perda de bentonita durante instalação
Excelentes características de auto-cicatrização	Bentonita com baixo teor de umidade é permeável ao gás
Não depende de disponibilidade de materiais naturais no local da obra	Problemas de resistência ao cisalhamento na interface com outros materiais
Fácil reparação	Pequena capacidade de atenuação de chorume
Resistência aos efeitos de congelamento-degelo	Possível perda de resistência pós pico
Maior volume gerado pela pequena espessura	Possível aumento da permeabilidade a longo prazo
Dispensa de ensaios de condutividade hidráulica no campo	Maior fluxo de contaminantes por difusão em comparação com CCLs
GCLs hidratados funcionam como barreira de gás	Troca de cátions (GCLs com bentonita sódica)
Reduz a sobre pressão no substrato compressível	Risco de dessecação se não coberto adequadamente (no mínimo 0,6 m de solo)

Vários tipos de GCLs são disponíveis no mercado e eles se diferenciam basicamente pelo (i) tipo de bentonita no núcleo, que pode ser granular ou em pó, e, quanto à natureza, podem ser cálcicas ou sódicas; (ii) tipo de geossintético que os compõem, geotêxteis ou geomembrana nas faces inferior e superior e (iii) processo de fabricação ou união das camadas do geocomposto: agulhagem, costura ou adesivo. A Figura 2.5 esquematiza alguns tipos de GCL disponibilizados no mercado.

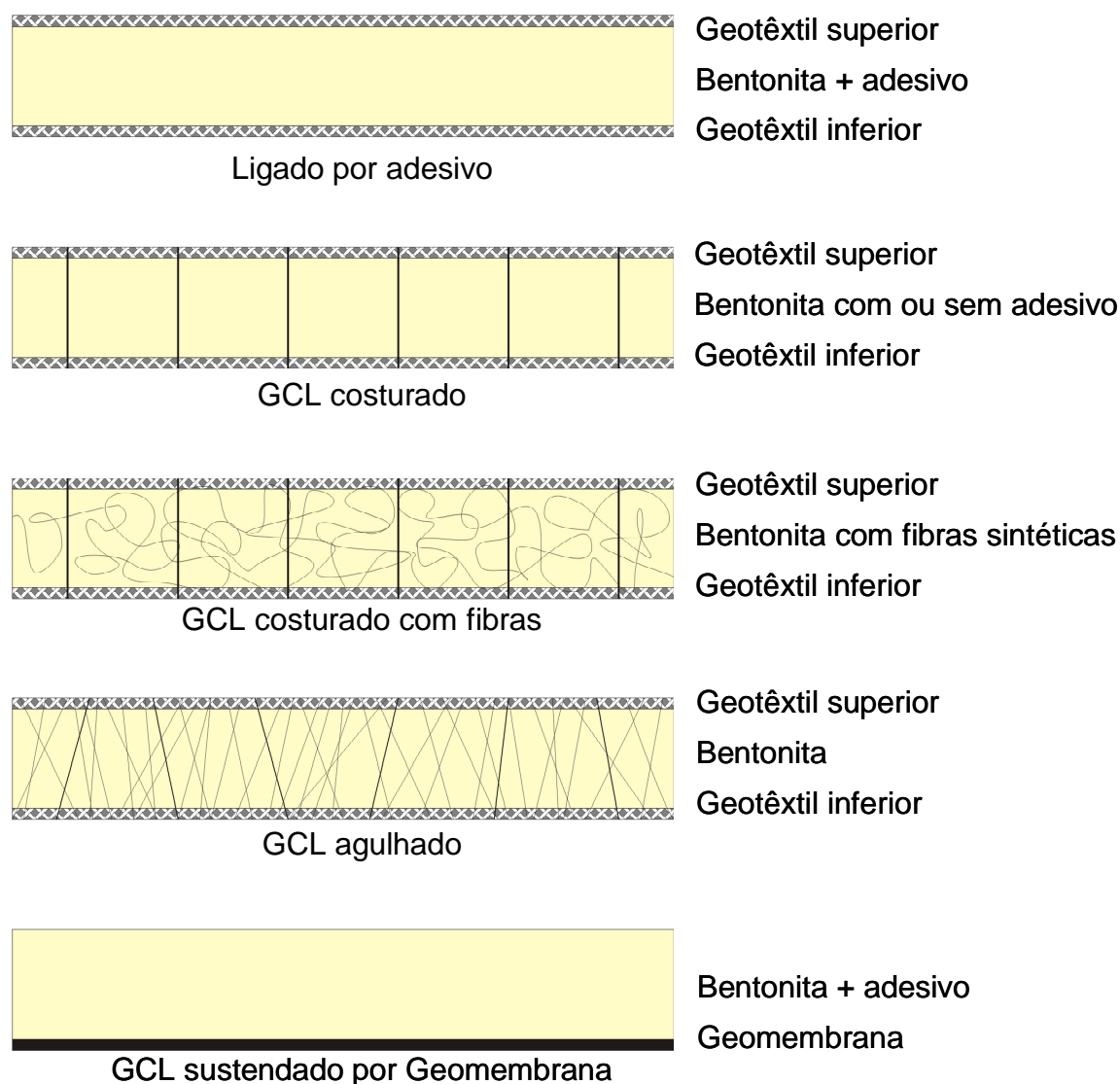


Figura 2.5 – Alguns tipos de GCL disponíveis no mercado (modificado de Koerner, 1994).

Os geossintéticos de suporte têm a função de manter a bentonita em uma estrutura planar para facilitar o transporte e instalação do GCL sobre superfícies. Esses geossintéticos podem ser geotêxteis (tecidos e/ou não tecidos) ou geomembranas. Nos casos em que a camada de bentonita é encapsulada entre dois geotêxteis, diferentes combinações entre o geotêxtil inferior e o superior podem ser usadas. Geotêxteis tecidos e não tecidos de gramaturas diferentes podem ser usados, e não necessariamente o mesmo geotêxtil compõe as superfícies inferior e superior do GCL. Geotêxteis nas duas faces do GCL podem atuar também como limitadores de expansão da bentonita, o que melhora o seu desempenho em termos de redução do coeficiente de permeabilidade (redução do “bulk void ratio”, conceito tratado por Petrov & Rowe, 1997). No caso de GCLs cujo suporte é uma geomembrana na sua face inferior, o processo de união entre a camada de geomembrana e a bentonita pode ser conseguido com a utilização de adesivos adicionados à bentonita ou colagem de um geotêxtil impregnado com bentonita a uma geomembrana. Outro tipo de GCL consiste geofilme embebido com polipropileno colado à superfície de um dos geotêxteis.

Quando hidratados e confinados, os GCLs desempenham funções de barreira contra vazamento de gases ou líquidos com seu desempenho dependendo, na maioria dos casos, da condutividade hidráulica da bentonita (Bouazza, 2002). A bentonita é, portanto o principal componente de um GCL. A baixa permeabilidade dos GCLs é conferida pela bentonita, material expansivo composto basicamente de esmectita e outros minerais. Vários tipos de bentonita podem compor o núcleo dos GCLs. Podem ser em pó ou granulares e, quanto à sua natureza, podem ser sódicas ou cálcicas, dependendo do cátion mais presente entre os silicatos da bentonita. Mais detalhes sobre as bentonitas que compõem os GCLs são apresentados a no item 2.3.2.

Os GCLs, portanto, são comumente usados em barreiras compostas complementando uma camada de argila compactada de baixa permeabilidade (CCL), não em substituição à mesma (Guyonnet et al., 2009; MEEDDAT, 2009), mas como reforço à CCL, como mostra a Figura 2.6. A camada de atenuação, a CCL e o GCL, compõem a barreira passiva de barreiras compostas em aterros sanitários (Guyonnet et al., 2009; Touze-Foltz et al., 2008), com uma geomembrana atuando como barreira ativa, como comenta o item 2.4.

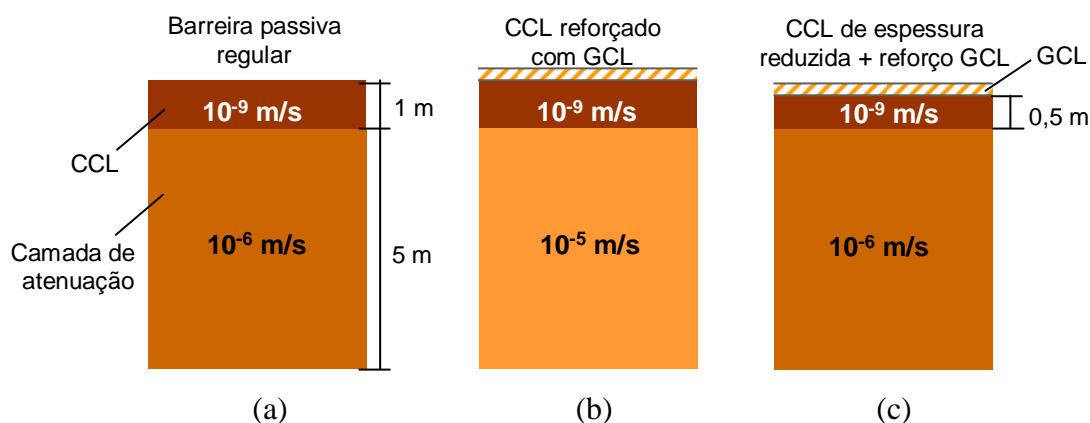


Figura 2.6 - Recomendações do uso de GCLs em barreiras na França (modificado – MEEDDAT, 2009).

## 2.3.2 BENTONITAS

### *Características das bentonitas*

De acordo com Egloffstein (2001; 2002), as bentonitas são argilas que apresentam uma grande capacidade de expansão, grande capacidade de troca catiônica e permeabilidade muito baixa. Bentonitas de boa qualidade, como as usadas em GCLs, geralmente contêm de 75 a 90% do seu peso de montmorilonitas, que são minerais compostos de três camadas (2:1): sendo uma camada de alumínio (octaédrica) entre dois silicatos (tetraédricos). Outros componentes da bentonita são o quartzo, crisobalita, feldspatos, mica, ilita, caulinita, carbonatos, zeolitas, sílica, hidróxidos de alumínio, componentes orgânicos, hematita, limonita e metais pesados, dentre outros (Grim, 1968; Grim & Güven, 1978; Egloffstein, 1995).

As bentonitas são classificadas como sódicas ou cálcicas, dependendo do cátion trocável predominante (Egloffstein, 1997). A expansão das bentonitas cálcicas (Bentonita-Ca), é consequência da expansão inter-cristalina devido à hidratação dos cátions entre as camadas de silicato. No caso das bentonitas sódicas (Bentonita-Na) a expansão é consideravelmente maior, uma vez que, além da expansão inter-cristalina, ocorre também a expansão osmótica, que causa a delaminação parcial dos silicatos, aumentando a distância entre eles, como mostra a Figura 2.7.



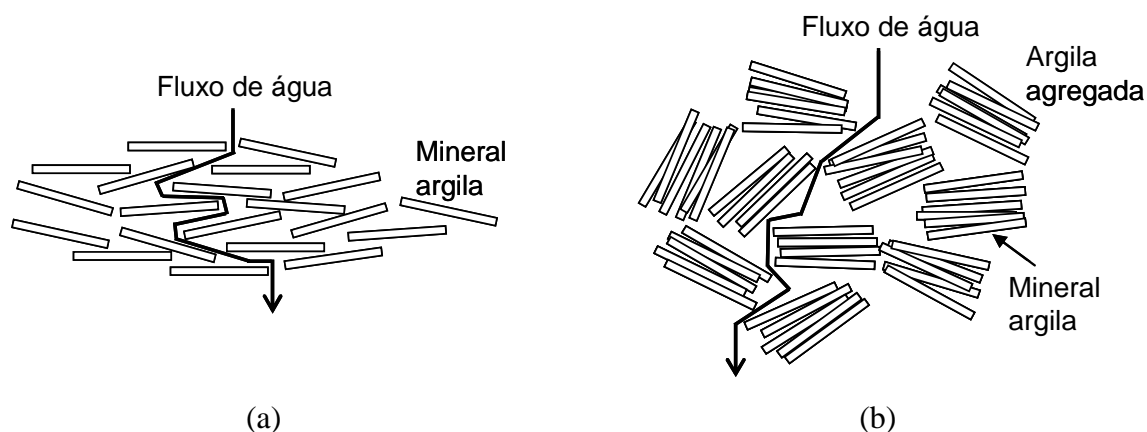


Figura 2.7 – Concepção da micro-estrutura e permeabilidade da argila (a) minerais de argila muito bem dispersos, i.e., bentonita sódica; (b) argila agregada devido à maior atração entre os cristais, i.e., bentonita cálcica (modificado de Hasenpatt, 1988).

Segundo Egloffstein (2002), a baixa permeabilidade das bentonitas é consequência de três fatores principais. Um deles é a dupla camada difusa envolvendo a partícula de argila. A partícula de argila com carga negativa causa a atração de íons de carga positiva formando uma dupla camada de cargas ao redor da partícula. A espessura da dupla camada difusa depende da concentração eletrolítica do fluido nos poros da argila. Quanto maior a concentração, menor a espessura da dupla camada difusa e maior a condutividade hidráulica. O segundo fator é a adesão de água nos cristais de montmorilonita. A água de hidratação e a água adsorvida são aderidas às partículas sólidas e apenas uma parte da água ocupando os poros da bentonita obedece à lei de Darcy. O terceiro fator é a microestrutura das partículas de argila: devido à delaminação parcial das camadas de silicato, bentonitas sódicas apresentam cristais de tamanhos menores (arranjo coloidal) e uma microestrutura dispersa, mais eficiente comparada às bentonitas cálcicas. Assim, bentonitas sódicas apresentam um menor volume permeável com caminhos de fluxo mais longos, contornando partículas individuais de argila. Segundo Bouazza (2002), bentonitas sódicas podem expandir de 10 a 15 vezes o seu volume quando hidratadas, enquanto que bentonitas cálcicas expandem de 2 a 4 vezes o volume inicial. Guyonnet et al. (2009) verificaram que GCLs compostos por bentonita cálcica natural apresentam condutividades hidráulicas maiores que GCLs compostos de bentonitas cálcica ativada ou sódica natural (Tabela 2.4). Mesmo tendo sido constatada a influência da natureza da bentonita na condutividade hidráulica dos GCLs, nenhum estudo foi feito para verificar a influência da natureza da bentonita na permeabilidade ao gás de GCLs ou na transmissibilidade da interface entre GM-GCL. A

diferença da permeabilidade de bentonitas sódicas e cálcicas desperta o interesse no estudo da influência da natureza da bentonita no fluxo através de barreiras envolvendo GCLs.

Tabela 2.4 – Condutividade hidráulica medida em oedopermeâmetro sob 100 kPa de pressão vertical com diferentes fluidos permeantes (Guyonnet et al., 2009).

GCL	Natureza da bentonita	Água destilada		Chorume sintético		Chorume real	
		k (m/s)	nv*	k (m/s)	nv*	k (m/s)	nv*
LX1	sódica natural	$2,4 \times 10^{-11}$	3,4	$2,5 \times 10^{-11}$	1,8	$1 \times 10^{-11}$	3,2
LX2	sódica natural	$1,2 \times 10^{-11}$	2,1	$1 \times 10^{-10}$	6,6	$1,7 \times 10^{-11}$	4,1
LX3	sódica natural	$1,4 \times 10^{-11}$	1,0	$3,3 \times 10^{-11}$	1,6	$1 \times 10^{-11}$	1,9
LX4	cálcica ativada	$3,5 \times 10^{-11}$	2,4	$1,1 \times 10^{-10}$	9,1	$4,4 \times 10^{-11}$	10,8
LX5	cálcica ativada	$1,8 \times 10^{-11}$	3,5	$3,7 \times 10^{-11}$	3,0	$1 \times 10^{-11}$	3,9
LX6	cálcica natural	$4,5 \times 10^{-9}$	1,3	$2 \times 10^{-10}$	14,2	$1,1 \times 10^{-10}$	9,7
LX7	cálcica ativada	$1,1 \times 10^{-11}$	2,4	$4,5 \times 10^{-11}$	13,2	$1 \times 10^{-11}$	2,6
LX8	cálcica natural	$4,7 \times 10^{-10}$	15,1	$1,8 \times 10^{-9}$	37,2	$6 \times 10^{-10}$	21,2

\*nv = relação entre o volume de líquido efluente e o volume de vazios no corpo de prova.

Bentonitas podem se apresentar nas formas de pó ou grânulos. As bentonitas granulares, por se apresentarem em grumos, tendem a expandir de forma mais lenta, uma vez que um filme de bentonita hidratada se forma ao redor de cada grumo, dificultando a hidratação do núcleo, como ilustra a Figura 2.8 (Vangpaisal & Bouazza, 2004). Em termos de condutividade hidráulica, Harpur et al. (1993) e Gleason et al. (1997) obtiveram melhores desempenhos de GCLs compostos por bentonitas em pó. Em termos de permeabilidade ao gás, Vangpaisal & Bouazza (2004) igualmente verificaram melhor desempenho de GCLs constituídos por bentonita em pó. Com relação a outros aspectos, Barroso et al. (2006) verificaram que bentonitas em pó ou granulares não apresentaram diferenças significativas em termos de curvas de retenção e o fluxo de líquido através de barreiras compostas GM-GCL não foi influenciado pelo tipo de bentonita (em pó ou granular) compondo o GCL.

### ***Troca de íons em bentonitas***

De acordo com Egloffstein (2001), bentonitas cálcicas naturais ocorrem com maior frequência na natureza e as bentonitas sódicas naturais são relativamente raras. Para conferir melhores propriedades de expansão, típicas de bentonitas sódicas, é possível compor uma bentonita cálcica ativada por meio de adição de carbonato de sódio, o que provoca a troca dos

cátions cálcio por cátions sódio. Essa troca ocorre por meio de um processo de equilíbrio de cargas em que os cátions monovalentes de sódio ( $\text{Na}^+$ ) são mais facilmente trocados por cátions divalentes de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) do que o contrário. Portanto, o processo necessário para ativar uma bentonita cálcica exige que uma grande concentração de carbonato de sódio seja adicionada, para que cátions de sódio substituam os de cálcio. Por outro lado, as concentrações de carbonato de cálcio (presentes naturalmente na bentonita ou fornecidas pelo chorume ou outras fontes em contato com a bentonita) provocam a troca contrária com maior facilidade, transformando uma bentonita sódica em bentonita cálcica. Guyonnet et al. (2009) propõe que a porcentagem de carbonato de cálcio da bentonita não exceda 5% do seu peso para garantir um desempenho adequado do GCL no fundo de aterros sanitários.

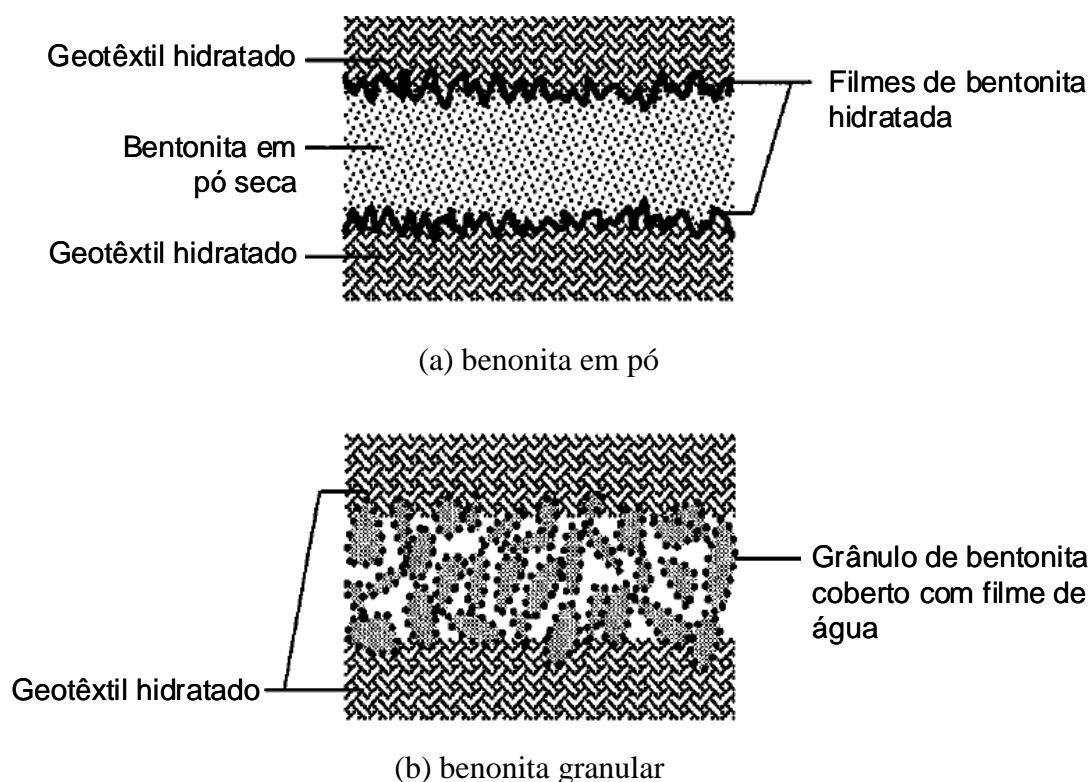


Figura 2.8 – Mecanismos de hidratação de bentonitas (a) em pó (b) granular (Vangpaisal & Bouazza, 2004).

A troca de íons sódio para íons cálcio favorece a aproximação das partículas de argila da bentonita, reduzindo a espessura da dupla camada difusa. A micro-estrutura tipicamente dispersa da bentonita sódica se transforma em uma estrutura mais agregada devido à maior atração entre os minerais quando os íons bivalentes de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) substituem os monovalentes de sódio ( $\text{Na}^+$ ), como se verifica na Figura 2.9. A estrutura mais agregada conferida pela maior atração das argilas na presença de íons cálcio aumenta a permeabilidade

da bentonita. Eggloffstein (2001) reporta aumentos de 3-6 vezes na permeabilidade da bentonita cálcica em relação à sódica.

As consequências da transformação de bentonita sódica em bentonita cálcica nas propriedades dos GCLs vêm sendo estudadas por diversos autores, principalmente no que concerne à permeabilidade dos GCLs. Devido à mudança da estrutura da bentonita, a troca de íons nos GCLs instalados no fundo dos aterros sanitários provoca o aumento da condutividade hidráulica do GCL. No entanto, as altas pressões confinantes sobre GCLs de fundo minimizam os efeitos da troca de íons. Um processo mais prejudicial é a troca de íons nos GCLs de camadas de cobertura de aterros sanitários, onde as tensões confinantes são menores ( $< 20$  kPa) (Bouazza, 2002).

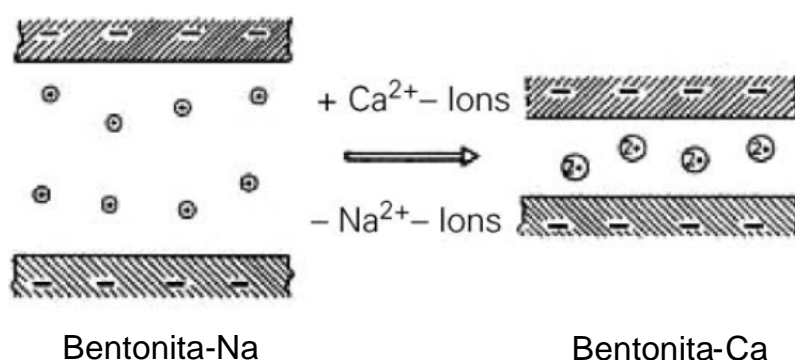


Figura 2.9 – Troca de íons de bentonita sódica para bentonita cálcica (Egloffstein, 2001).

Com relação à permeabilidade ao gás de GCLs instalados em coberturas de aterros sanitários, Lin & Benson (2000) reportam que a troca de íons não pode ser responsável por aumentos de 3 ordens de grandeza na permeabilidade de GCLs. Eles chamam a atenção para a importância das fissuras por dessecação da bentonita, que são muito mais importantes no aumento da permeabilidade e que a troca de íons tem apenas uma influência indireta. Segundo estes autores, a troca de íons da bentonita não afeta de forma significativa a permeabilidade, justificando aumentos de apenas 3 a 5 vezes, o que não é considerado alarmante. Discussões adicionais relacionadas à influência da dessecação da bentonita na sua permeabilidade serão apresentadas no item 3.1.4 dessa tese.

Sobre a questão inevitável a respeito da escolha de um GCL composto de bentonita cálcica ao invés de bentonita sódica, visto que a troca de íons é inevitável, Eggloffstein (2001) pondera que um GCL originalmente de bentonita sódica, cujos íons foram trocados transformando-a

em bentonita cálcica, apresentam ainda valores de permeabilidade três vezes menores que o GCL composto originalmente de bentonita cálcica (Figura 2.10).

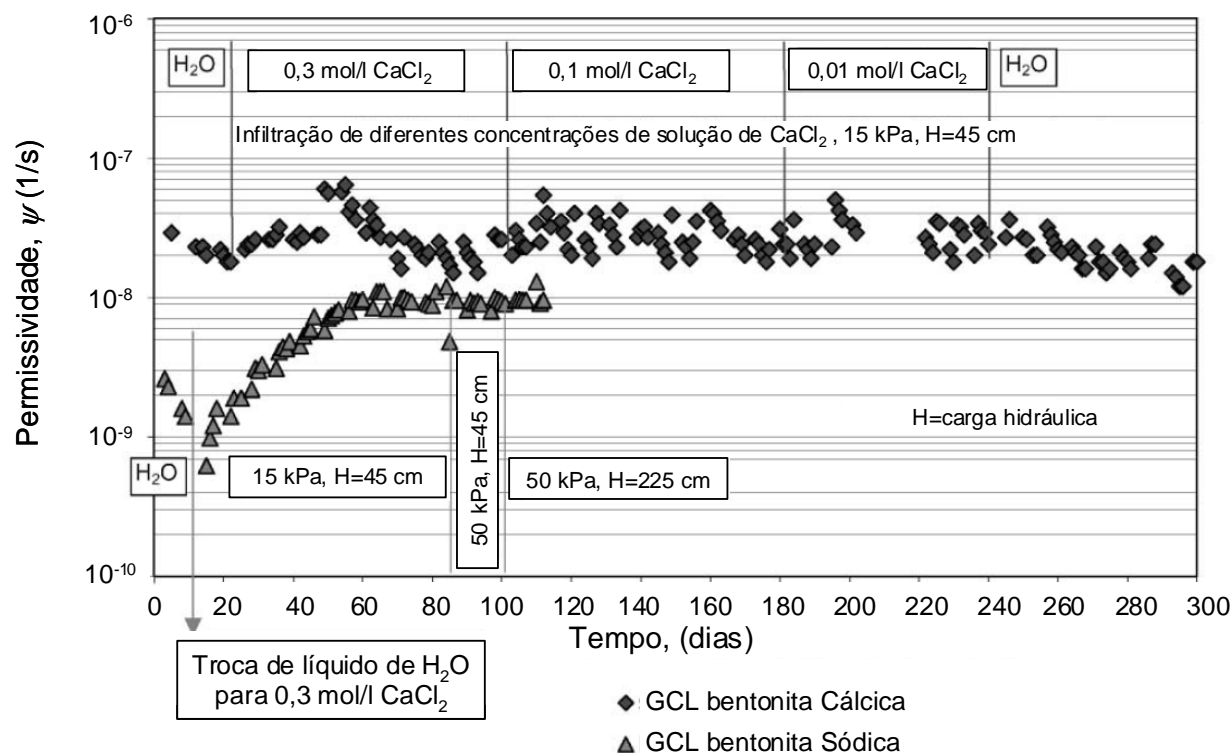


Figura 2.10 – Comparação de permeabilidades entre GCLs à base de bentonita sódica ou cálcica (Egloffstein, 2001).

## 2.4 BARREIRAS COMPOSTAS

Em engenharia geotécnica, a pequena espessura das geomembranas é útil na redução do volume que seria ocupado por uma camada de argila compactada instalada para atuar como barreira de fluidos. Sua utilização implica também em redução do tempo de construção da obra, visto que a instalação da geomembrana é mais rápida e depende menos das condições climáticas, comparado à compactação de camadas de argila. No entanto, a pequena espessura das geomembranas, associada aos métodos de instalação e às protuberâncias de materiais subjacentes e/ou sobrejacentes à mesma, aumentam sua susceptibilidade a danos mecânicos como expõem os dados apresentados no item 2.2.2.

No caso de danos na geomembrana, vazamentos significativos podem ocorrer se a mesma estiver instalada sobre um solo permeável. Caso o solo subjacente apresente baixa condutividade hidráulica, o vazamento é menor. Segundo Giroud & Bonaparte (1989b), o

interesse da associação de uma geomembrana (barreira ativa) sobrepondo um solo de baixa condutividade hidráulica (barreira passiva), formando uma barreira composta, pode ser resumido da seguinte forma: (i) a geomembrana reduz o vazamento, enquanto o solo aumenta o tempo necessário para o líquido atravessar a barreira composta em caso de dano na GM; (ii) o solo de baixa permeabilidade reduz o fluxo que atravessa o dano da geomembrana.

Em uma barreira composta, o líquido que atravessa um dano na geomembrana primeiramente escoar lateralmente através da interface entre a geomembrana e o material subjacente até atingir certa distância do dano, quando então a infiltração no material subjacente se torna mais relevante. A vazão do líquido bem como a distância que ele percorre na interface depende de diversos fatores, tais como a dimensão do dano na geomembrana, a carga hidráulica sobre a geomembrana, a transmissibilidade da interface, a condutividade hidráulica do material subjacente e a espessura da barreira composta (Giroud & Bonaparte, 1989b; Giroud, 1997).

Várias pesquisas na literatura mostram que o vazamento de líquidos através de uma barreira composta devido a danos na geomembrana é fortemente influenciado pelo espaço entre a geomembrana e a superfície subjacente. O contato entre a geomembrana e a superfície do solo depende de diversos fatores, desde a rigidez da geomembrana até a pressão confinante exercida pelo solo subjacente. Nos ensaios de Brown et al. (1987), por exemplo, os autores verificaram que quanto maior a rigidez da geomembrana, maior a espessura do espaço vazio entre a geomembrana e a superfície do solo e, conseqüentemente, maior a vazão. Verificou-se também que este espaço aumenta com a granulometria do solo subjacente. O solo subjacente influencia o vazamento, portanto, tanto pela sua condutividade hidráulica (geralmente materiais com maior granulometria são mais permeáveis), quanto pela qualidade da interface de contato entre a geomembrana e a superfície subjacente.

Quando um GCL é instalado sob a geomembrana, é maior a possibilidade de se obter uma melhor qualidade da interface entre os materiais, com o benefício da baixa condutividade hidráulica de um GCL hidratado (Giroud, 1997). Isso porque os GCLs apresentam baixíssima condutividade hidráulica, além de formarem uma superfície de contato uniforme, favorecendo uma maior qualidade de contato GM-GCL. Segundo Bouazza et al. (2002), entre as vantagens do uso de GCLs incluem-se o baixo custo relativo, fácil instalação, espessura reduzida e boa acomodação em superfícies não uniformes.

## 2.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Nesse capítulo foram apresentados os geossintéticos para impermeabilização, suas características, bem como os problemas que podem comprometer o seu desempenho como barreira. No caso de GCLs, a perda de umidade da bentonita, a troca catiônica entre outros fatores, podem comprometer o seu desempenho como barreira. Em condições típicas da cobertura de aterros sanitários, pesquisas reportam que o vazamento de gás através de um GCL pode atingir vazões da ordem de  $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  (Didier et al., 2000; Bouazza & Vangmaisaal, 2003; Vangpaisal & Bouazza, 2004) dependendo do tipo de GCL, condições da cobertura entre outros fatores.

Em barreiras compostas, um dano na geomembrana pode provocar vazamentos, comprometendo a estanqueidade do sistema. Algumas pesquisas estudaram o vazamento de líquidos e gases através de barreiras compostas GM-GCL-CCL devido a um dano na geomembrana simulando condições típicas do fundo de aterros sanitários. Essas pesquisas reportam vazões variando entre  $10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$  e  $10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$  (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006; 2008; 2010; Bergamini et al., 2009). Uma revisão das principais pesquisas dedicadas ao estudo do transporte de gases através de GCLs e transporte de líquidos através de barreiras compostas é apresentada no Capítulo 3 a seguir.

### 2 LES GEOSYNTHETIQUES : BARRIERES ETANCHES DES ISD

#### Résumé

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur l'utilisation des géosynthétiques pour l'étanchéité du fond et de la couverture des Installations de Stockage de Déchets (ISD). La couverture étanche d'un ISD joue un rôle important pour éviter l'augmentation de charge hydraulique dans le massif de déchets et aussi pour limiter les fuites de biogaz de l'intérieur du massif vers l'atmosphère. Au fond des ISD, la barrière étanche limite la contamination du sol et de la nappe phréatique par le lixiviat (item 2.1).

La définition des géosynthétiques assurant la fonction d'imperméabilisation, les géomembranes (GM) et les géosynthétiques bentonitiques (GCL), est décrite ainsi que les principaux problèmes qui peuvent compromettre ses performances sous les conditions typiques des ISD. Dans le contexte général de la thèse – l'étude de l'écoulement de gaz et liquides au travers des barrières géosynthétiques sous conditions typiques des ISD – ce chapitre présente donc des éléments qui permettent de justifier le choix des matériaux testés et des conditions des essais en laboratoire qui se rapprochent des conditions sur site.

Du fait de leur faible épaisseur, les géomembranes sont sensibles aux endommagements mécaniques. L'item 2.2 montre que 71% des endommagements mécaniques ont lieu pendant l'installation de la couche drainante (matériau granulaire) sur la géomembrane. Plusieurs recherches montrent que la majorité de ces endommagements ont moins de 500 mm<sup>2</sup> de superficie. Concernant le GCL (item 2.3), la bentonite est son principal composant. La relation entre la conductivité hydraulique et le type de bentonite - sodique ou calcique - dans le GCL justifie l'intérêt de l'étude de l'influence du type de bentonite sur l'écoulement de gaz et liquides au travers des barrières géosynthétiques. Les étanchéités composites considérées sont décrites dans l'item 2.4. L'installation d'un GCL entre la GM et le CCL limite l'écoulement en cas d'endommagement dans la GM.



### **3 TRANSPORTE DE LÍQUIDOS E GASES ATRAVÉS DE BARREIRAS GEOSSINTÉTICAS**

A importância das barreiras geossintéticas em aterros sanitários bem como os principais problemas que podem comprometer a estanqueidade desses materiais em instalações desse tipo foram apresentados no Capítulo 2. O capítulo que segue apresenta a revisão bibliográfica sobre o transporte de fluidos através de barreiras geossintéticas buscando relacionar aqueles problemas com os materiais apresentados no Capítulo 2 e as conseqüências em termos de vazamento de líquidos ou gases através das barreiras geossintéticas. As bases teóricas, soluções analíticas e equações empíricas apresentadas serão úteis no entendimento dos mecanismos de transporte e serão usadas nas análises de resultados da presente pesquisa. Os resultados de pesquisas anteriores apresentados no presente capítulo servem de comparação com os resultados obtidos na presente pesquisa. O item 3.1 a seguir apresenta a revisão bibliográfica referente ao estudo da permeabilidade ao gás de GCLs apresentado na Parte II dessa tese. O item 3.2 apresenta a revisão bibliográfica referente ao estudo do transporte de líquido através de barreiras compostas (estudo apresentado na Parte III).

#### **3.1 VAZAMENTO DE GÁS NA COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**

##### **3.1.1 MIGRAÇÃO DE GASES ATRAVÉS DE MEIOS POROSOS**

A migração de gases através de meios porosos, como solos ou GCLs, pode ocorrer por dois mecanismos de transporte: difusivo ou advectivo. O transporte difusivo é governado pelo gradiente de concentrações com o fluxo de gás ocorrendo no sentido da região de maior concentração para a de menor concentração. O transporte advectivo é governado pelo gradiente de pressões totais e o fluxo de gás ocorre no sentido da região de maior pressão total para a região de menor pressão total. Na cobertura de aterros sanitários com GCLs, a principal força que governa o transporte de gases é a diferença de pressões totais dentro e fora do aterro (Bouazza et al., 2002a).

### ***Transporte por difusão***

O mecanismo de difusão através de um meio poroso obedece à lei de Fick, expressa pela Equação 3.1, em que o gradiente de concentração entre dois meios procura o equilíbrio pela passagem de moléculas da região mais concentrada para a menos concentrada.

$$F_g = -D_e \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.1)$$

Onde  $F_g$  é o fluxo difusivo de massa de gás que atravessa uma unidade de superfície por uma unidade de tempo;  $C$  é a diferença de concentração da fase gasosa;  $D_e$  é o coeficiente de difusão efetivo do gás;  $z$  é a distância (espessura ou altura) percorrida pelo gás no material poroso e  $\partial C/\partial z$  é o gradiente de concentração.

O sinal negativo significa que o sentido do fluxo de gás é oposto ao sentido do aumento da concentração. Verifica-se na Equação 3.1 uma relação linear entre o fluxo de gás e o gradiente de concentração, quando na realidade a difusão não é função somente da concentração. A Equação 3.1, com quatro variáveis, é difícil de ser usada para problemas reais e uma equação mais simples se torna necessária. O princípio básico dessa equação pode ser usado para deduzir a equação diferencial da difusão (Bouazza et al., 2002a). Em condições unidimensionais, a concentração pode mudar com o tempo e lugar. Obedecendo as condições de continuidade, a variação de concentração pode ser determinada pela segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial^2 z} \quad (3.2)$$

As leis de Fick (Equações 3.1 e 3.2) podem ser resolvidas analiticamente para condições de contorno simples para obtenção do coeficiente de difusão efetivo,  $D_e$ , e dos perfis de concentração de gás. Uma discussão detalhada do cálculo de  $D_e$  pode ser encontrada em Yanful (1993), Aubertin et al. (2000) e Cabral et al. (2000).

### ***Transporte advectivo***

O transporte de gás através de meios porosos tem características diferentes do transporte de líquidos (Dullien, 1975). Primeiramente, a compressibilidade dos gases contribui para que o fluxo através do material poroso não seja permanente. Depois, o valor de permeabilidade ao gás pode variar de acordo com a capacidade de adsorção do gás na superfície das partículas.

Outra diferença consiste na velocidade do fluxo de gás nas paredes dos poros, que geralmente não pode ser assumida como igual a zero. O “slip-flow”, fluxo relacionado à não aderência das moléculas de gás às paredes dos poros, é atribuído à estrutura molecular descontínua do gás e é independente da viscosidade do mesmo (Carman, 1956). Esse efeito resulta em um fluxo maior do que o que seria previsto pela lei de Darcy, que é baseada no fluxo viscoso (que considera a velocidade nas paredes dos poros como igual a zero). No entanto, de acordo com Klinkenberg (1941), a contribuição do “slip-flow” no fluxo global de gás através de meios porosos é muito pequena, podendo ser desconsiderada. Brusseau (1991) indicou que o “slip-flow” não era observado quando o diferencial de pressões era menor que 20 kPa e, portanto, pode ser excluído do processo de modelagem do transporte advectivo de gases. O mesmo estudo indicou que para baixos diferenciais de pressão, é válido assumir a incompressibilidade do gás. Neste contexto, os modelos desenvolvidos para o fluxo de água podem ser usados para estudar o fluxo de gases. Baseando-se na Lei de Darcy, a vazão unidimensional de gás através de um meio poroso pode ser expressa por:

$$Q = -\frac{k}{\mu} A \frac{dP}{dx} \quad (3.3)$$

Onde:  $Q$  é a vazão;  $k$  é a permeabilidade intrínseca do meio poroso;  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido;  $A$  é a seção transversal do material poroso e  $dP/dx$  é o gradiente de pressão.

Assume-se que a permeabilidade intrínseca é função apenas do material poroso e não do fluido permeante. Considerando a compressibilidade dos gases, a vazão muda com o decréscimo do gradiente de pressão. No entanto assume-se que os gases nos aterros sanitários obedecem à equação de continuidade de gases ideais.

$$\frac{\rho_0 T_0}{P_0} = \frac{\rho T}{P} \quad (3.4)$$

Onde  $\rho_0$  é a densidade do gás na pressão padrão  $P_0$  e temperatura padrão  $T_0$  e  $\rho$  é a densidade do gás na pressão  $P$  e temperatura  $T$ .

Assumindo que a vazão em massa seja constante ( $\rho Q = \text{constante}$ ) e aplicando-se a lei da conservação de massa (Equação 3.4) o fluxo permanente de gás pode ser descrito na Equação 3.5 a seguir:

$$\frac{d}{dx}(\rho Q) = 0 \quad (3.5)$$

Das Equações 3.3 a 3.5 uma equação linear diferencial para fluxo permanente unidimensional em um meio poroso isotrópico e homogêneo em condições isotérmicas é obtida (Vangpaisal & Bouazza, 2004):

$$\frac{d^2}{dx^2}(P^2) = 0 \quad (3.6)$$

Para uma amostra de espessura  $L$ , a solução para a Equação 3.6 é sujeita a condições de contorno  $P = P_1$  em  $x = 0$  e  $P = P_2$ , então em  $x = L$ :

$$P^2 = P_1^2 + \left( \frac{P_2^2 - P_1^2}{L} \right) x \quad (3.7)$$

Das Equações 3.2 a 3.7, a vazão de gás numa distância  $x$  pode ser obtida pela Equação 3.8 abaixo:

$$Q_x = -\frac{kA}{2\mu L} \frac{(P_2^2 - P_1^2)}{\sqrt{P_1^2 + \frac{(P_2^2 - P_1^2)}{L} x}} \quad (3.8)$$

Considerando a vazão de gás na distância  $L$ , a Equação 3.8 torna-se:

$$Q_L = -\left( \frac{k}{\mu} \right) A \frac{(P_2^2 - P_1^2)}{2LP_2} \quad (3.9)$$

É sabido que a aplicação da lei de Darcy só é válida num domínio restrito em que o fluxo é laminar. O número de Reynolds, definido pela Equação 3.10, deve estar entre 1 e 10 (Bear, 1972) para que a lei de Darcy seja aplicável.

$$Re = \frac{vd}{\eta} \quad (3.10)$$

Onde  $v$  é a velocidade do fluxo;  $d$  designa o diâmetro médio dos grãos da matriz porosa e  $\eta$  denota a viscosidade cinemática do fluido.

### 3.1.2 PESQUISAS SOBRE TRANSPORTE ADVECTIVO DE GASES ATRAVÉS DE BARREIRAS GEOSSINTÉTICAS

#### *Influência das características das amostras e solicitações de ensaio*

Em coberturas aterros sanitários, a função da barreira é prevenir o fluxo da precipitação para o interior do sistema (o que aumentaria o volume de chorume no interior da célula e conseqüentemente a carga hidráulica nos materiais revestindo o fundo do aterro sanitário), bem como controlar o escape de gases para o ambiente. A permeabilidade ao gás dos geossintéticos bentoníticos vem sendo estudada por meio de equipamentos que medem a vazão de gás que atravessa a amostra de GCL quando um diferencial de pressão é aplicado entre as duas faces do GCL, como recomenda a norma AFNOR XP P84-707 (2005), do Comitê Francês de Geossintéticos. Pesquisas que investigam a permeabilidade ao gás de GCLs têm mostrado a importância da hidratação do material para garantir baixas permeabilidades. Nos próximos parágrafos serão apresentados sucintamente os resultados de algumas dessas pesquisas.

Didier et al. (2000) utilizou em seus estudos um permeâmetro que consiste em uma célula cilíndrica bipartida de aço, com 205 mm de diâmetro interno (Figura 3.1). O corpo de prova do GCL fica confinando entre duas camadas de material granular. O sistema de carregamento permite a aplicação de pressões normais que variaram de 20 a 80 kPa. Uma conexão para entrada do gás nitrogênio ( $N_2$ ) é ligada ao cilindro superior, enquanto a saída de gás, bem como o medidor de fluxo, são localizados no cilindro inferior da célula. A pressão na porta de saída é igual à pressão atmosférica.

Os autores realizaram ensaios com GCLs agulhados compostos de bentonita sódica natural em pó (BF) ou granular (BM). A variação da permeabilidade ao gás foi estudada em função da umidade volumétrica,  $v$ , processo de hidratação, pressão confinante e diferencial de pressão de gás aplicado. Como esperado, a permeabilidade decresce com o aumento da umidade volumétrica. Para um intervalo de umidade de  $46\% < v < 73\%$  a permeabilidade decresceu entre 1 e 1,5 ordem de magnitude para o GCL BM (Figura 3.2) No caso do GCL BF, num intervalo de  $26\% < v < 66\%$  a permeabilidade decresceu entre 2 e 3 ordens de magnitude (Figura 3.3). Quanto ao processo de hidratação dos corpos de prova, a aplicação de uma sobrecarga de 20 kPa durante a hidratação resultou em menores permeabilidades, comparado a corpos de prova hidratados sem sobrecarga. Já a variação da pressão confinante

de 20 ou 80 kPa provocou diferenças de menos de uma ordem de grandeza na permeabilidade dos GCLs estudados. A respeito da quantidade de ar,  $a$ , (relação entre o volume de ar e o volume total das amostras) Foram verificadas relações bem definidas (com coeficientes de correlação entre 0,95 e 0,98) entre o logaritmo da permeabilidade e a quantidade de ar,  $a$ , em cada GCL estudado, independente da pressão confinante aplicada nos ensaios, como mostra a Figura 3.4.

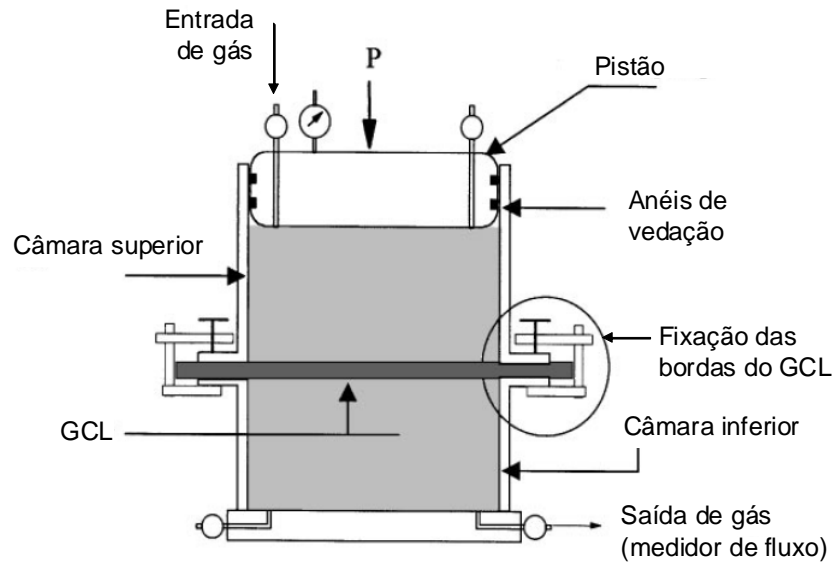


Figura 3.1 – Célula de permeabilidade ao gás de GCLs (Didier et al., 2000).

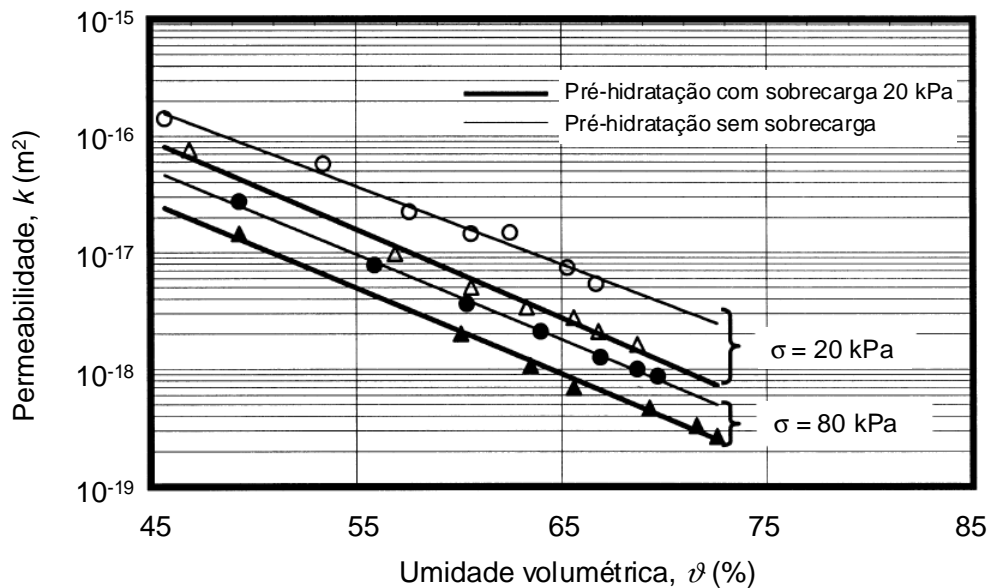


Figura 3.2 – Permeabilidade versus umidade volumétrica para GCL BM (Didier et al., 2000).

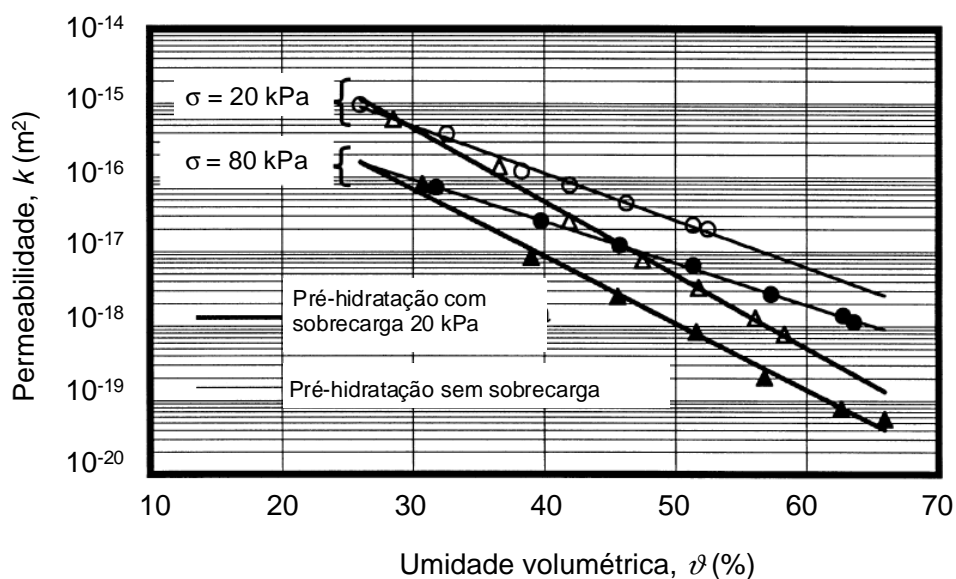


Figura 3.3 - Permeabilidade versus umidade volumétrica para GCL BF (Didier et al., 2000).

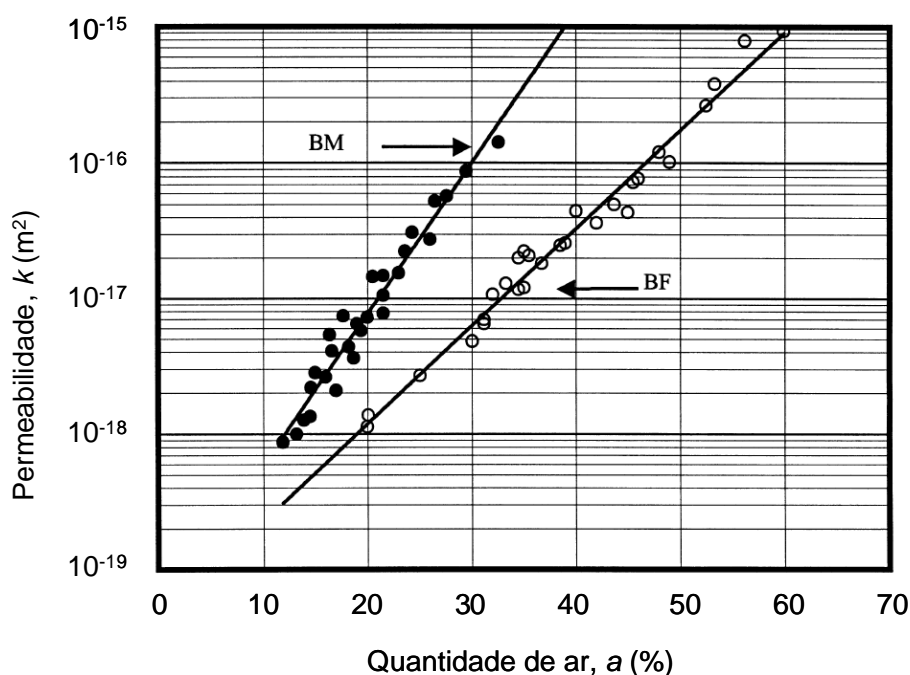


Figura 3.4 – Permeabilidade versus volume de ar (Didier et al., 2000).

Bouazza & Vangpaisal (2002) propuseram um dispositivo de ensaio (Figura 3.5) com o mesmo princípio de funcionamento do equipamento proposto por Didier et al. (2000). O diâmetro interno da célula cilíndrica bipartida é de 100 mm. O corpo de prova do GCL é posicionado entre duas camadas de material granular (areia) com 20 mm de espessura. Um pistão sobre a camada superior de areia aplica pressões confinantes de 20 kPa. Um diferencial

de pressão de gás de até 40 kPa é aplicado por meio de injeção de gás nitrogênio no cilindro superior da célula.

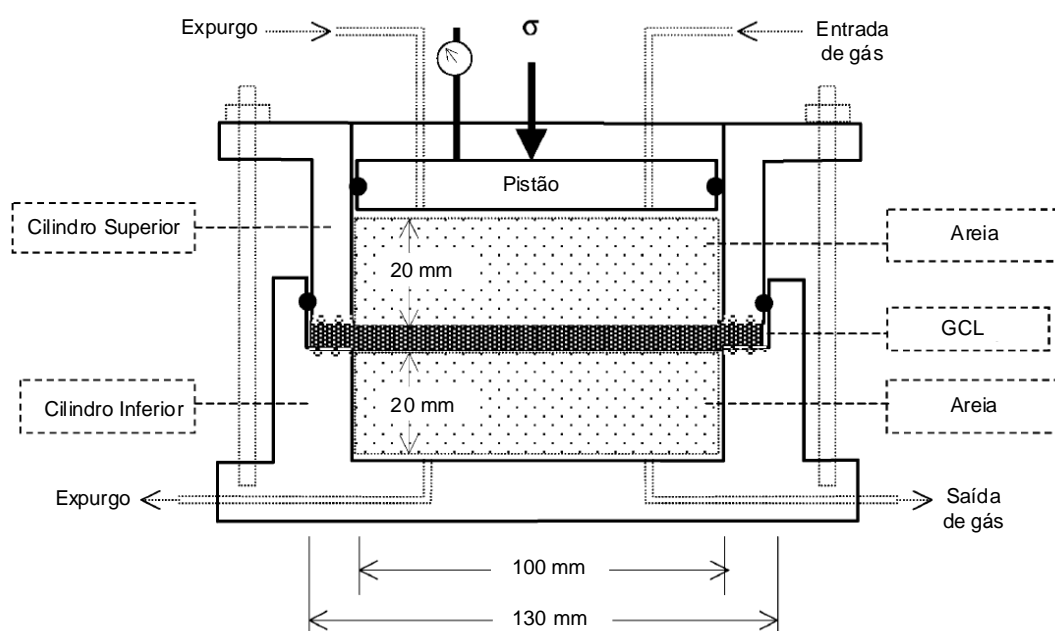


Figura 3.5 – Célula de permeabilidade ao gás de GCLs (Bouazza & Vangpaisal, 2002).

Utilizando esse equipamento, Bouazza & Vangpaisal (2002; 2003) estudaram três GCLs agulhados compostos de bentonita sódica granular ou em pó. Os resultados apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7 se referem ao GCL agulhado composto por um núcleo de bentonita sódica em pó encapsulado entre dois geotêxteis. Os resultados destacaram a redução da permeabilidade intrínseca dos GCLs com o aumento do teor de umidade volumétrica: para  $8 < \vartheta < 71\%$ , a permeabilidade intrínseca decresceu 5 ordens de grandeza (Figura 3.6). O processo de cura do GCL também influenciou a sua permeabilidade ao gás. No caso de amostras com  $\vartheta > 40\%$ , maiores vazões foram obtidas em amostras submetidas à expansão livre do que em amostras submetidas à cura sob 20 kPa de confinamento durante a hidratação (Figura 3.7).

Vangpaisal & Bouazza (2004) complementaram estudos anteriores (Bouazza & Vangpaisal, 2002; 2003), e compararam os resultados obtidos para os GCLs agulhados com os de um GCL costurado composto por bentonita sódica em pó encapsulada entre dois geotêxteis tecidos de polipropileno. Verificou-se que a estrutura do GCL e a forma da bentonita são fatores chave nos mecanismos de hidratação e expansão dos GCLs. Enquanto os GCLs agulhados expandem-se de forma mais homogênea ao longo de toda sua superfície, os GCLs



costurados expandem em forma de “travesseiro”, devido à limitação da expansão ao longo das costuras nos casos de hidratação sem sobrecarga (Figura 3.8). Comparando GCLs com bentonita sódica em pó, os costurados apresentaram maiores permeabilidades que os agulhados. Para condições comparáveis, apesar da variação da permeabilidade com as características dos GCLs estudados, para amostras com alto teor de umidade volumétrica ( $\vartheta > 70\%$ ) o efeito da sobrecarga durante a hidratação se sobrepõe aos demais efeitos.

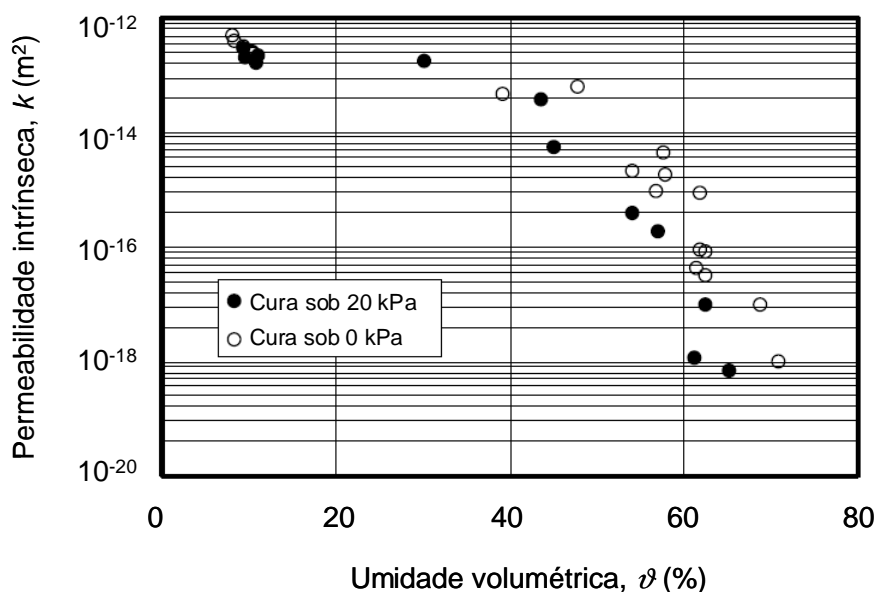


Figura 3.6 – Relação entre a permeabilidade intrínseca do GCL e sua umidade volumétrica (Bouazza & Vangpaisal, 2003).

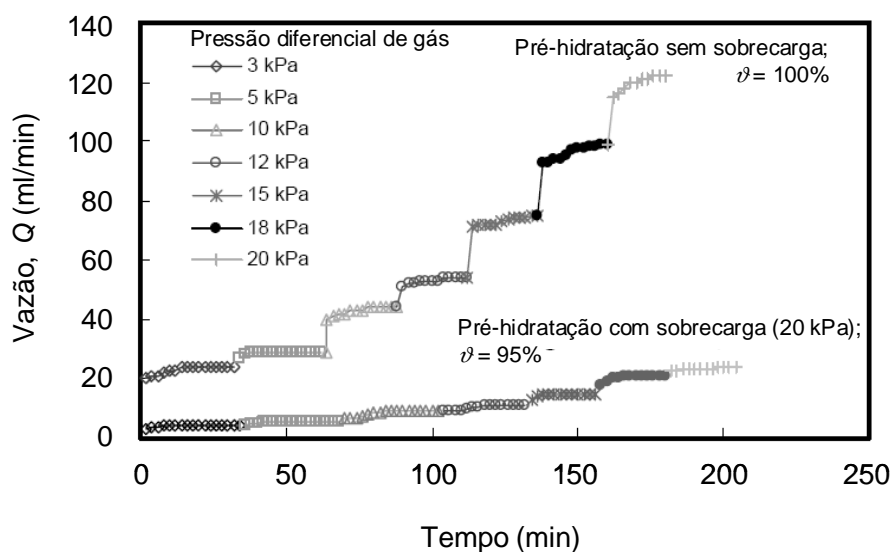
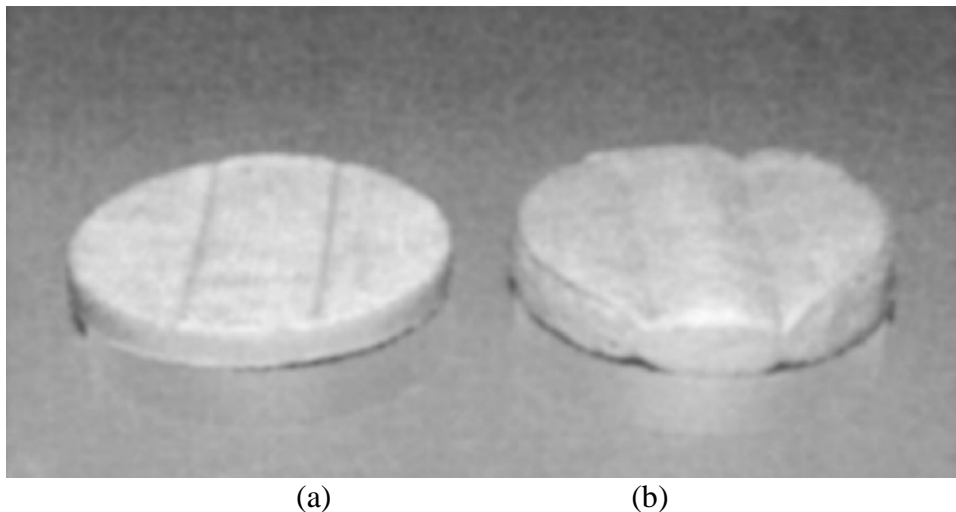


Figura 3.7 – Evolução da vazão de gás em função do tempo para vários diferenciais de pressão de gás: efeito da sobrecarga na pré-hidratação (Bouazza & Vangpaisal, 2003).



(a) (b)  
Figura 3.8 – Amostras de GCL costurado hidratados (a) com sobrecarga (b) sem sobrecarga (Vangpaisal & Bouazza, 2004).

Depois de diversas pesquisas sobre a permeabilidade ao gás de GCLs, Bouazza & Vangpaisal (2006) ampliaram o estudo investigando vazamentos através de barreiras compostas GM-GCL. De acordo com esses autores, o vazamento de gás através de uma barreira GM-GCL pode ser considerado similar ao vazamento de água. No entanto, o fluxo de gás obedece a mecanismos diferentes e ocorreria em sentido contrário do fluxo de água através de uma barreira composta. Os autores utilizaram a mesma célula de permeabilidade ao gás proposta por Bouazza & Vangpaisal (2002), apresentada previamente na Figura 3.5. Nos estudos feitos com GCL agulhado composto por bentonita sódica em pó encapsulada entre dois geotêxteis verificou-se que o vazamento aumentava com o aumento da pressão diferencial de gás para o intervalo estudado (1 a 10 kPa) e diminuía com o aumento do teor de umidade dos GCLs. Para teor de umidade do GCL de 10%, o diâmetro do furo na geomembrana (que variou de 3 a 8 mm) influenciou o vazamento de gás através da barreira composta (Figura 3.9). Já com o GCL a 97% de umidade as vazões de gás foram pelo menos 3 ordens de grandeza menores (Figura 3.10), comparado ao caso com GCL a 10% de umidade, não tendo sido notadas diferenças significativas da vazão devido à variação do diâmetro do furo na geomembrana para os casos GCL com os maiores teores de umidade.

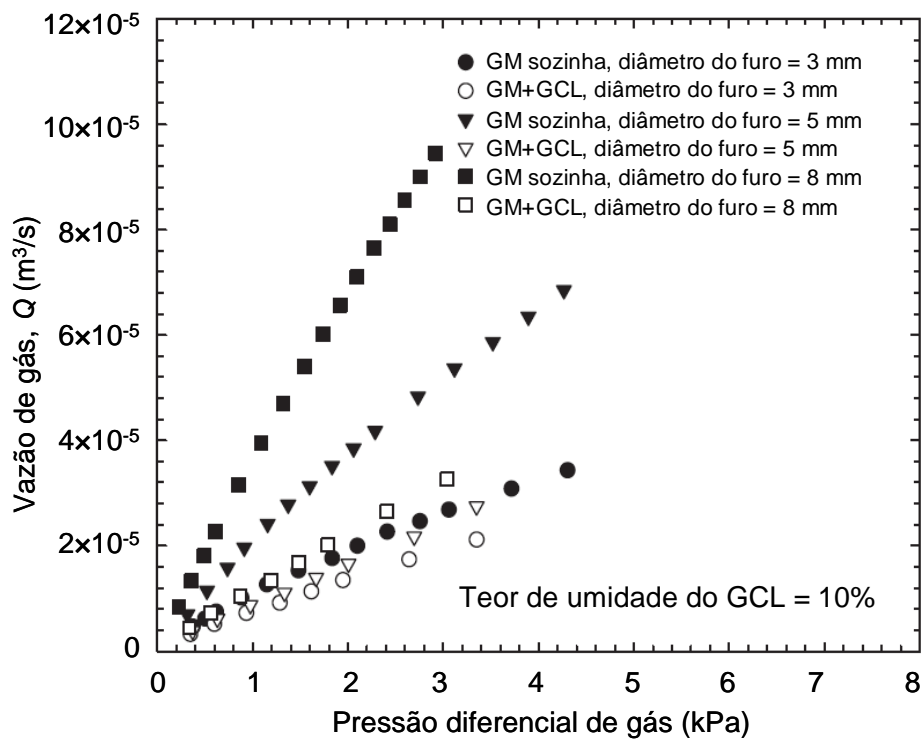


Figura 3.9 - Efeito do diâmetro do dano na geomembrana no vazamento de gás para GCL com baixo teor de umidade (Bouazza & Vangpaisal, 2006).

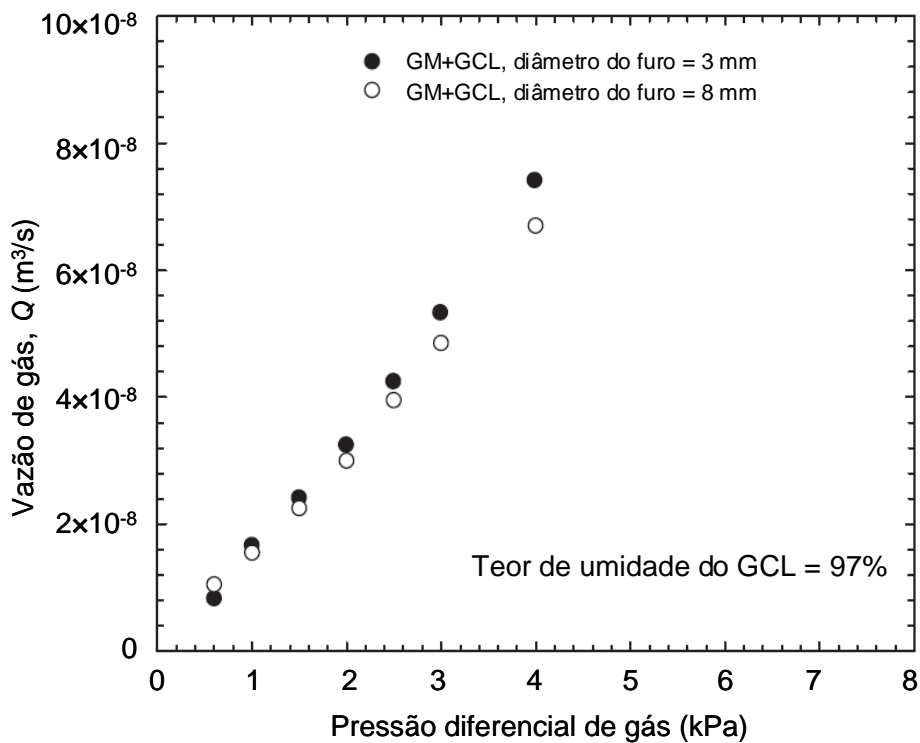


Figura 3.10 – Efeito do diâmetro do dano na geomembrana no vazamento de gás para GCL com alto teor de umidade (Bouazza & Vangpaisal, 2006).

### *Influência da dessecação dos GCLs*

Ainda sobre o efeito do teor de umidade na permeabilidade ao gás de GCLs, mas considerando a dessecação pós hidratação dos corpos de prova ensaiados, Shan & Yao (2000) estudaram dois GCLs compostos de bentonita sódica granular encapsulada entre dois geotêxteis. O GCL BM era agulhado e o GCL CL era ligado por adesivo. As amostras eram hidratadas e em seguida dessecadas com maior ou menor intensidade antes de serem submetidas aos ensaios. Uma rede de fissuras pôde ser observada em amostras de GCL CL com menos de 140% de umidade. Nas amostras de GCL BM não foram observadas fissuras por dessecação, pois as fibras da agulhagem evitaram a formação de grumos na bentonita. Após a dessecação, os corpos de prova eram submetidos a ensaios de permeabilidade ao gás em equipamento baseado na medida de fluxo de gás através do GCL. A diferença de pressão aplicada era de menos de 2 kPa. Devido à rede de fissuras desenvolvida durante a dessecação, amostras de GCL CL apresentaram maiores valores de permissividade (relação entre a permeabilidade ao gás e a espessura do GCL) que as amostras de GCL BM (Figura 3.11).

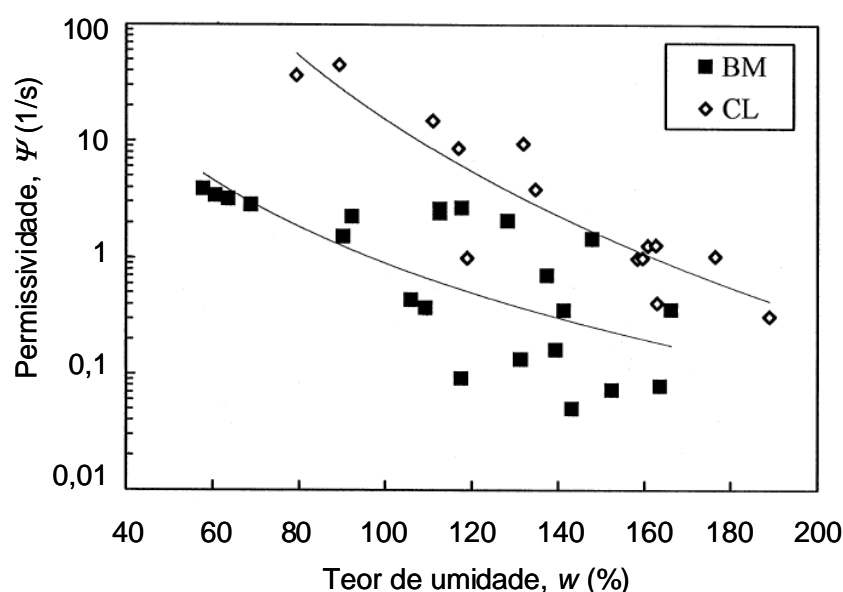


Figura 3.11 – Permissividade dos GCLs (amostras dessecadas) em função do teor de umidade (Shan & Yao, 2000).

Vangpaisal et al. (2002) também estudaram os efeitos da dessecação dos GCLs na permeabilidade ao gás. Nesse estudo, as amostras foram submetidas a duas séries de ensaio utilizando o equipamento mostrado na Figura 3.5 para a verificação variação da permeabilidade em ciclos de aumento ou redução da umidade das amostras. A primeira série de ensaios consistiu em hidratar as amostras de GCL em diferentes teores de umidade e

determinar a permeabilidade de cada amostra. A segunda série consistiu em hidratar uma amostra de GCL a 160% de umidade e determinar valores de permeabilidade após sucessivas perdas de umidade ao ar livre. Na Figura 3.12 verificam-se maiores valores de permeabilidade no ciclo de secagem: para um mesmo valor de umidade, a permeabilidade da amostra no ciclo de secagem pode ser até duas ordens de grandeza maior do que o valor observado no ciclo de umedecimento. Os autores atribuíram esse resultado à formação de fissuras por dessecação da bentonita no núcleo dos GCLs submetidos ao ciclo umedecimento-secagem. Os resultados reforçam a importância da proteção do GCL de cobertura em aterros sanitários para evitar a perda de umidade da bentonita, o que pode comprometer a eficiência da barreira.

### *Influência da deformação dos GCLs*

Soltani (1997) estudou a permeabilidade ao gás de 3 GCLs diferentes sujeitos a deformação de tração devido ao recalque. Bouazza & Vagpaissal (2004) utilizaram um dispositivo para deformação axi-simétrica dos GCLs que podiam atingir até 30% de deformação. Foram ensaiados corpos de prova de um GCL agulhado nas condições seco ou hidratado. Os autores verificaram que na condição seca, as amostras deformadas apresentavam permeabilidades ao gás comparáveis ao das amostras indeformadas. O mesmo não ocorreu nos ensaios com GCLs hidratados: houve aumento de permeabilidade das amostras deformadas com relação aos valores obtidos para amostras indeformadas, como mostra a Figura 3.13.

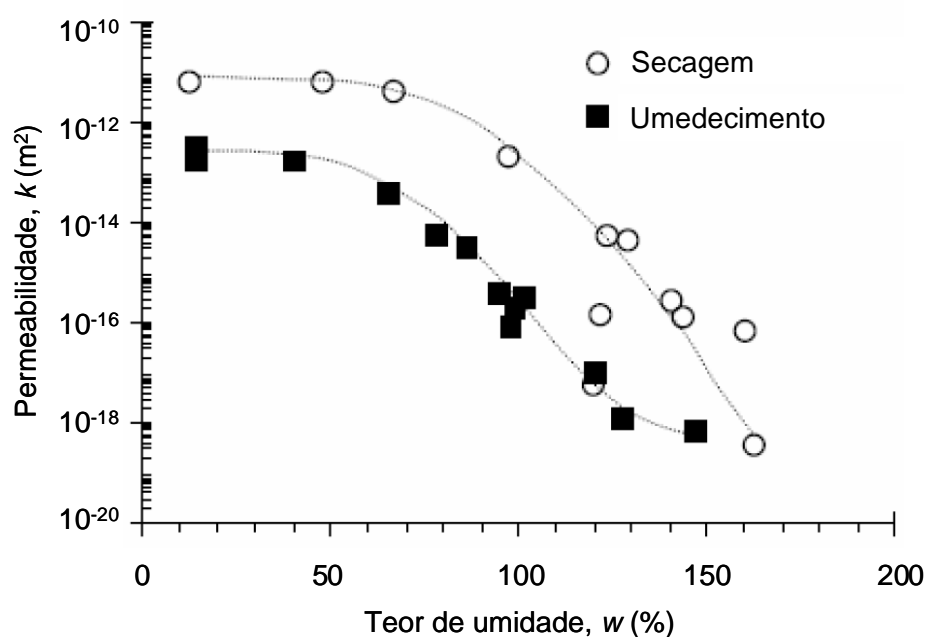


Figura 3.12 – Variação da permeabilidade intrínseca em ciclos de umedecimento e secagem do GCL (Vangpaissal et al., 2002).

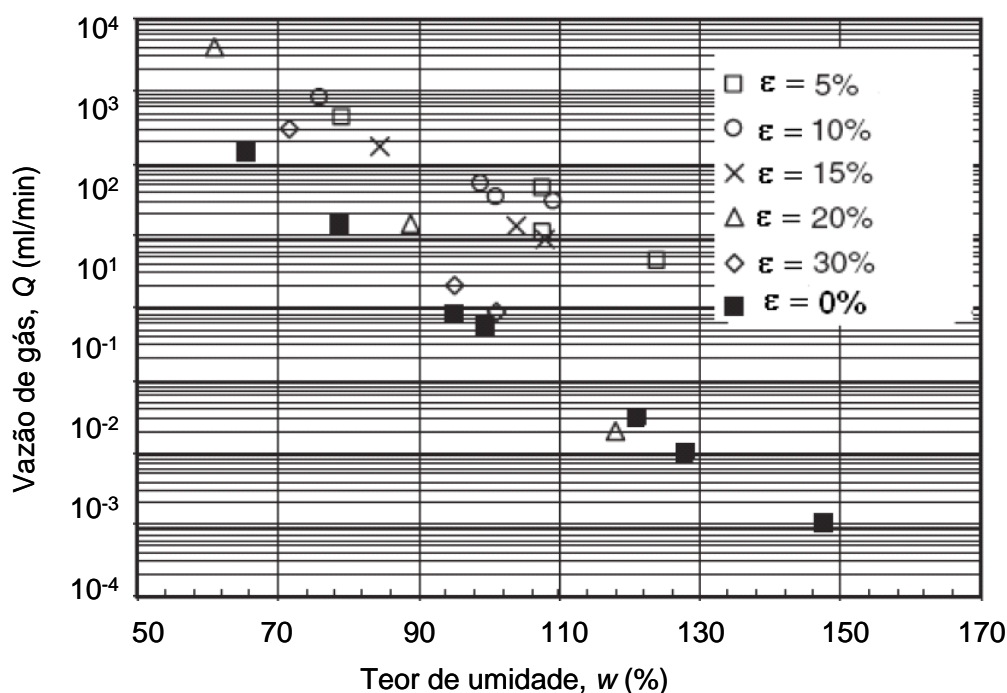


Figura 3.13 – Variação da vazão com o teor de umidade de GCLs hidratados e deformados (Bouazza & Vangpaisal, 2004).

### 3.1.3 MÉTODO DA QUEDA DE PRESSÃO

A permeabilidade dos geossintéticos bentoníticos vem sendo estudada por meio de equipamentos que medem a vazão de gás que atravessa a amostra de GCL em regime de fluxo permanente, quando um diferencial de pressão é aplicado entre as duas faces do GCL, como o recomendado pela norma AFNOR XP P84-707 (2005) do Comitê Francês de Geossintéticos. Os equipamentos propostos por Bouazza & Vangpaisal (2002), Didier et al. (2000) e Shan & Yao (2000), apresentados no item 3.1.2, seguem essa metodologia. O projeto de norma ISO CD 10773 (ISO, 2007) recomenda que a vazão de gás seja medida quando as condições de fluxo permanente forem atingidas, sob uma diferença de pressão constante entre as faces do GCL igual a 15 kPa. Entretanto, o regime de fluxo permanente necessários nesses equipamentos pode demorar a ser atingido em amostras com alto grau de saturação, aumentando a possibilidade de influência das variações externas nos resultados obtidos. Bouazza & Vangpaisal (2003) citam ensaios de 3 a 9 horas de duração, dependendo do teor de umidade da bentonita.

Uma forma de reduzir o tempo necessário para atingir o regime permanente de fluxo seria aplicar um maior o diferencial de pressão de gás. Didier et al. (2000) verificaram uma redução

de 6 vezes no tempo de estabilização do fluxo quando o diferencial de pressão aumentou de 10 kPa para 40 kPa. Estas altas pressões aplicadas não correspondem exatamente à situação tipicamente encontrada em aterros sanitários, onde é improvável que pressões diferenciais sejam maiores que 10 kPa (McBean et al., 1995). Além disso, Bouazza & Vangpaisal (2003) sugerem que em amostras com baixos teores de umidade, diferenciais de pressão maiores que 20 kPa podem causar a dessecação da bentonita ou migração da água dos poros da bentonita, criando caminhos preferenciais de fluxo através do GCL, interferindo nos resultados de permeabilidade.

Finalmente, chega-se a um impasse em que: (i) baixos diferenciais de pressão exigem muito tempo até que se possa medir a vazão através do corpo de prova (quando o regime permanente de fluxo é atingido), o que aumenta as chances de influência da variação de fatores externos nos resultados obtidos e (ii) altos diferenciais de pressão reduzem a duração do ensaio, mas podem modificar o corpo de prova, reduzindo a acurácia dos resultados obtidos. Neste contexto, seria interessante que um ensaio pudesse medir de forma acurada a permeabilidade ao gás de GCLs sem que fosse necessária a aplicação de diferenciais de pressão de gás elevados.

Para reduzir o tempo dos ensaios sem que fosse necessário aumentar o diferencial de pressão, Pitanga (2007) inovou no estudo da permeabilidade ao gás de GCLs propondo um novo equipamento chamado “permeômetro de fluxo transiente”. Este equipamento, ao invés de fazer medidas de vazão do gás que atravessa o corpo de prova, mede a queda de pressão dentro de uma câmara hermeticamente fechada, tendo o GCL como face superior. Trata-se do “Método da Queda de Pressão” para a medida baixíssimas permeabilidades. Esse método foi introduzido por Brace et al. (1968) para medir a permeabilidade à água de rochas graníticas e posteriormente foi estendido para a medida da permeabilidade de outros materiais de baixa permeabilidade como rochas, solos (Haskett et al., 1988; Carles et al., 2007; Barral, 2008), concreto (Figg, 1973; Claisse et al., 2003) e asfalto (Li et al., 2004).

O equipamento proposto por Pitanga (2007), permeômetro de fluxo transiente, foi utilizado também na presente pesquisa e será descrito detalhadamente no Capítulo 5, juntamente com as bases teóricas dos cálculos necessários para determinação da permeabilidade intrínseca do material poroso. Dentre as maiores vantagens do método da queda de pressão estão a redução da duração do ensaio e a possibilidade de medir a permeabilidade aplicando diferenciais de pressão menores dos que seriam aplicados em ensaios com fluxo permanente.

Pitanga (2007) estudou um GCL agulhado composto por bentonita sódica natural encapsulada entre geotêxteis tecido e não tecido. Foi observada boa repetibilidade dos resultados dos ensaios conduzidos, como se verifica na Figura 3.14. Os valores de permeabilidade intrínseca determinados variaram de  $2,49 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  a  $6,86 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  para 7 teores de umidade diferentes variando entre 60,4 a 99,7%. Verificou-se boa coerência desses resultados com os de pesquisas anteriores (Figura 3.15), utilizando equipamentos baseados no método do fluxo permanente, certificando a validade do dispositivo proposto.

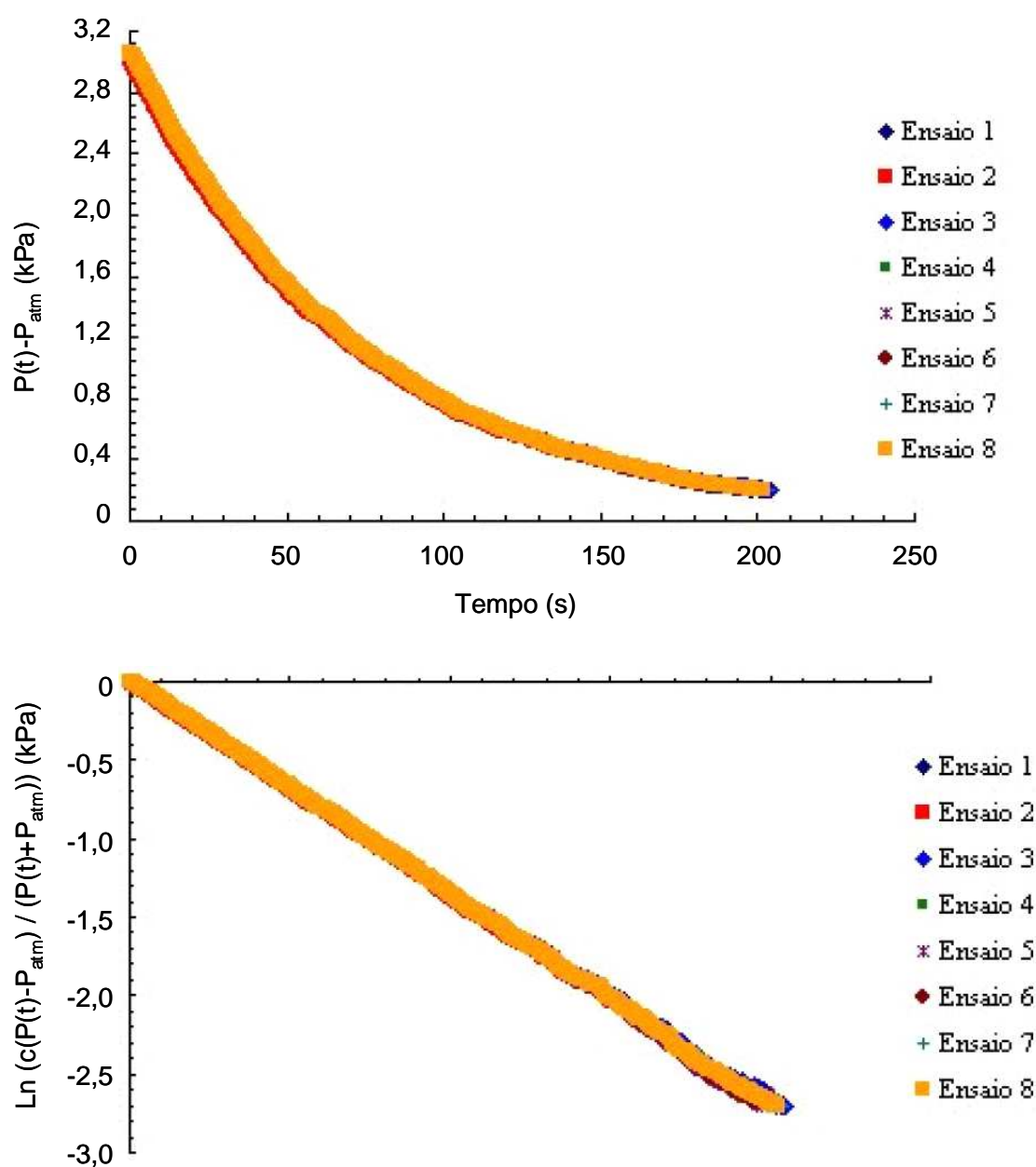


Figura 3.14 - Cinética de queda de pressão do gás azoto ao longo do tempo: amostra de GCL com  $w = 99,7\%$  (Pitanga, 2007).



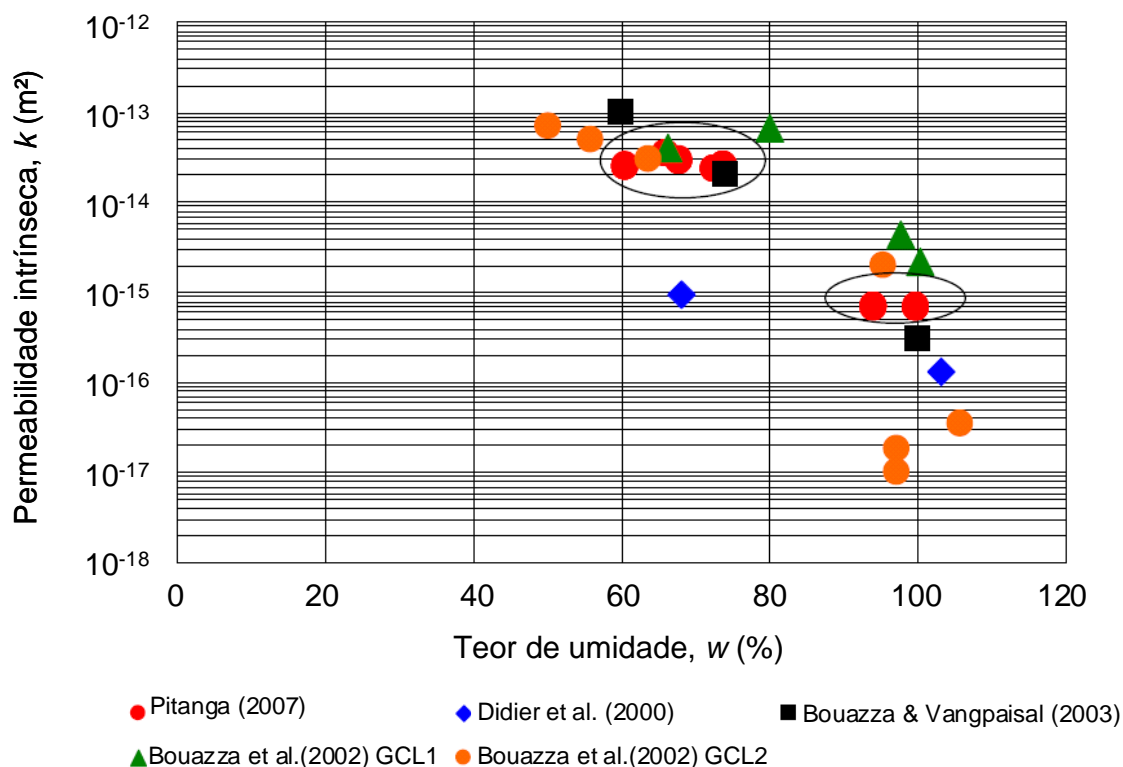


Figura 3.15 – Variação da permeabilidade intrínseca com o teor de umidade de amostras de GCL hidratadas em expansão livre (tensão confinante de ensaio de 20 kPa) (Pitanga, 2007).

### 3.1.4 DESSECAÇÃO, FISSURAS E TROCA DE CÁTIOS NO CAMPO

Como mostram os resultados apresentados no item 3.1.2, o bom funcionamento do GCL como barreira de fluidos depende da sua hidratação. Portanto, a perda de umidade pode ser relacionada diretamente com a perda de eficiência do GCL. Algumas pesquisas mostram que o GCL pode desidratar-se significativamente no campo. Melchior (2002) observou aumentos nos vazamentos através da camada de cobertura no aterro Georgswerder, nas proximidades de Hamburgo, na Alemanha, depois de dois períodos de seca na região. O autor reportou variações entre 55 e 100% do teor de umidade do GCL de cobertura no aterro. A camada de solo de proteção sobre o GCL era de 45 cm (quando normalmente adota-se 100 cm). Escavações permitiram observar que a bentonita dos GCLs exumados apresentavam claramente uma rede de fissuras. Verificou-se que a troca de cátions sódio para cálcio estava quase completa e foram encontradas ainda algumas penetrações de raízes no GCL. Ensaio de laboratório com amostras exumadas comprovaram o aumento de 4 a 5 ordens de grandeza na permissividade do GCL desidratado, comparado à permissividade inicial do GCL antes da instalação no aterro. Não foi verificada auto-cicatrização do GCLs nessas condições extremas.

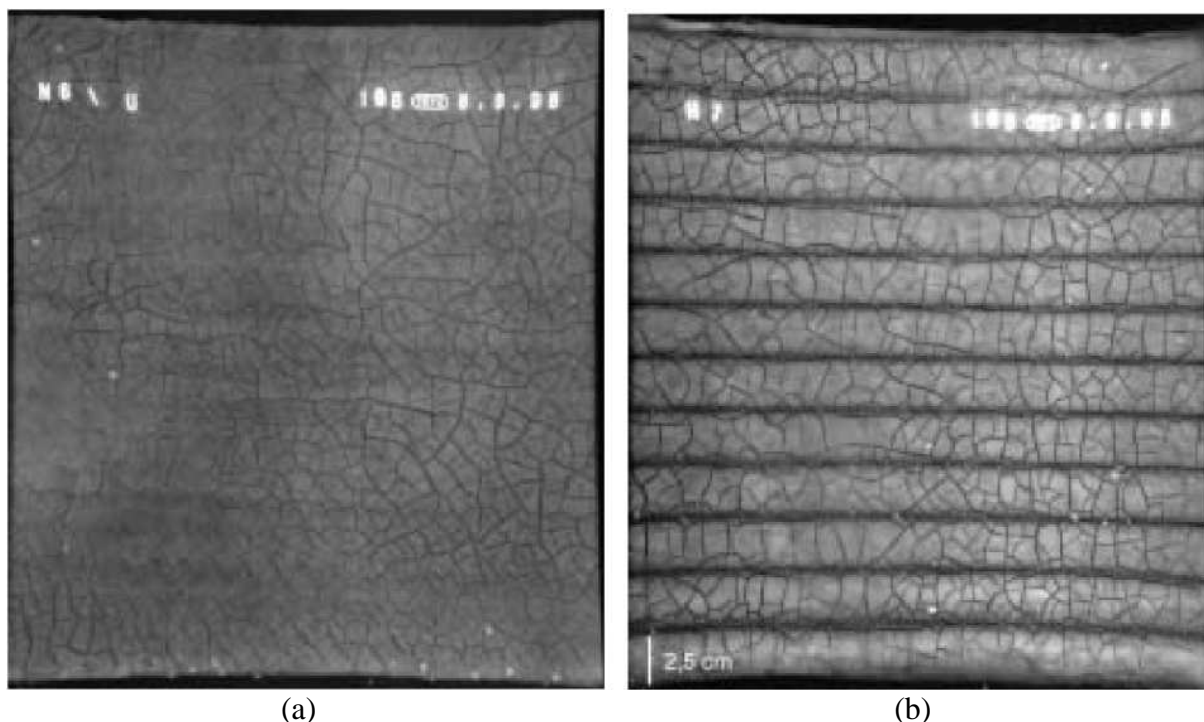


Figura 3.16 – Fissuras em GCLs exumados da cobertura do aterro sanitário de Hamburg-Georgswerder (a) GCL agulhado com 3 kg/m<sup>2</sup> de bentonita sódica natural; (b) GCL costurado com 5 kg/m<sup>2</sup> de bentonita cálcica ativada (Melchior, 2002).

A situação descrita por Melchior (2002), no entanto, não pode ser considerada como padrão. Sporer (2002, citado por Zanzinger, 2008) também estudou as propriedades de GCLs instalados na cobertura de aterros sanitários protegidos sob camadas de proteção mineral, com espessuras que variavam de 50 a 100 cm e com idades entre 3 e 6 anos. Foram feitas oito escavações de sistemas de cobertura para exumar amostras de GCLs. Verificou-se que as bentonitas sódicas haviam se transformado em bentonita cálcica devido troca de cátions. Permissividades determinadas em ensaios de laboratório variaram de  $5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  a  $1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ , o que foi atribuído à troca de cátions da bentonita. Apesar da relativa pequena espessura da camada de proteção mineral em alguns casos, nenhuma fissura na bentonita dos GCLs foi observada em imagens de raios-X. Heerten & Maubeuge (1997) verificaram que houve troca de cátions nos três aterros sanitários reportados, cujas camadas de proteção mineral sobre o GCL variavam de 60 a 100 cm de espessura. A permissividade dos GCLs exumados variava entre  $1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  e  $1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ .

Heerten (2004, citado por Zanzinger, 2008) descreve os resultados de escavações no aterro Tagewerben localizado em uma região bastante seca. As escavações foram feitas no outono de 2003, após verão bastante quente. A camada de proteção do GCL nesse aterro tinha 140 cm de espessura. O autor verificou que a troca de cátions do GCL ocorreu ao longo de 5

anos e a permissividade era de  $1,2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . Não foi reportada dessecação do GCL; a bentonita encontrava-se ainda com 125% de umidade.

Mais recentemente, Meer & Benson (2007) exumaram GCLs de coberturas de aterros sanitários. Os autores verificaram que nem mesmo a camada de proteção sobre o GCL com espessura de 75 a 100 cm, ou até mesmo outra barreira geossintética sobreposta ao GCL, puderam assegurar a proteção contra a troca de cátions na bentonita. Também não foi evitado o aumento da condutividade hidráulica nas condições climáticas estudadas (clima da América do Norte). Em apenas dois dos aterros reportados pelos autores, a troca de cátions foi evitada, seja pela condição da superfície ou pelas condições de umidade e alta precipitação (aterro na Flórida).

Outros estudos sobre o comportamento do sistema de cobertura de aterros sanitários foram feitos por meio de medidas em lisímetros instalados no campo (sem necessidade de exumar amostras de GCL). Siegmund et al. (2001) observaram variações no teor de umidade dos GCLs durante 3 anos de estudo no aterro de Thuringia. Outros autores (Henken-Mellies, 2005; Heerten & Maubeuge, 1997; Blümel et al., 2006; Arlst & Wolsfeld, 2004; Benson et al., 2007) verificaram eficiências acima de 95% dos sistemas de cobertura de aterros sanitários instrumentados. A troca de cátions foi observada em todos os casos e o grau de dessecação dependeu de diversos fatores como pressão confinante, camadas de drenagem, raízes no solo de cobertura entre outros (Sivakumar Babu et al., 2002).

Outros autores verificaram a dessecação dos GCLs por meio de ensaios de laboratório simulando as condições que seriam encontradas no campo. Sporer et al. (2000) e Sporer & Gartung (2002) fizeram ensaios variando o gradiente de temperatura e verificando o transporte ou perda de umidade ao longo da barreira. Heerten & Reuter (2002) estudaram a dessecação dos GCLs por meio de circulação de ar em ensaios feitos num permeâmetro. Os estudos indicaram teores de umidade críticos entre 95 e 100% (quando a sucção da bentonita provoca a fissuração da mesma) após troca de cátions, com redução de 2 ordens de grandeza nos valores de condutividade hidráulica dos GCLs dessecados comparado ao GCL hidratado.

### **3.1.5 COMENTÁRIOS**

Os estudos anteriores sobre a permeabilidade ao gás de GCLs destacam a importância do teor de umidade do material para garantir um bom desempenho como barreira de gás. A variação

da permeabilidade com o teor de umidade dos GCLs reforça a necessidade de proteger o GCL instalado na cobertura de aterros sanitários contra a dessecação. Outro tema bastante discutido nos trabalhos precedentes consiste na troca catiônica das bentonitas que pode modificar a estrutura da mesma e finalmente reduzir a eficiência dos GCL como barreira de gases. Alguns estudos reportam a evolução da permeabilidade ao gás dos materiais originalmente à base de bentonita sódica que sofreram troca catiônica transformando-se em bentonita cálcica. Na proposta da presente pesquisa, justifica-se, portanto, o interesse em verificar a influência de bentonitas originalmente de naturezas diferentes (que não tenham sofrido troca catiônica) na permeabilidade dos GCL. O estudo da permeabilidade ao gás de GCLs a base de bentonitas diferentes é apresentado na Parte II dessa tese. O estudo em questão foi desenvolvido com permeâmetro de fluxo transiente proposto recentemente por Pitanga (2007) com o objetivo de aproximar ao máximo as condições de laboratório àquelas que seriam encontradas no campo buscando inclusive consolidar o método proposto pelo autor.

Outro objetivo da tese é estudar a influência da natureza da bentonita no transporte de líquido através de barreiras compostas em condições típicas do fundo de aterros sanitários. O item 3.2 a seguir apresenta a revisão bibliográfica referente a esse estudo.

### **3.2 VAZAMENTO DE LÍQUIDO NO FUNDO DE ATERROS SANITÁRIOS**

#### **3.2.1 MIGRAÇÃO DE LÍQUIDOS ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS DEVIDO A UM DANO NA GEOMEMBRANA**

De acordo com Brown et al. (1987) e Giroud & Bonaparte (1989a; b), o mecanismo de vazamento através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana consiste em (i) primeiramente o líquido flui através do dano na geomembrana, (ii) este líquido escoar lateralmente, se existe espaço, através da interface entre a geomembrana e o material subjacente até certa distância (o que define o raio da área molhada) e finalmente (iii) o fluido infiltra no material subjacente (Figura 3.17). Este espaço na interface entre a geomembrana e o material subjacente só não existe quando os dois materiais apresentam perfeito contato entre si, o que seria a condição ideal de uma barreira composta. No entanto, essa é uma condição difícil de obter no campo devido às protuberâncias do material subjacente, trilhas de roda, ondulações ocorridas durante a compactação do solo ou rugas nas geomembranas (Brown et al., 1987; Rowe, 1998; Cartaud et al., 2005).

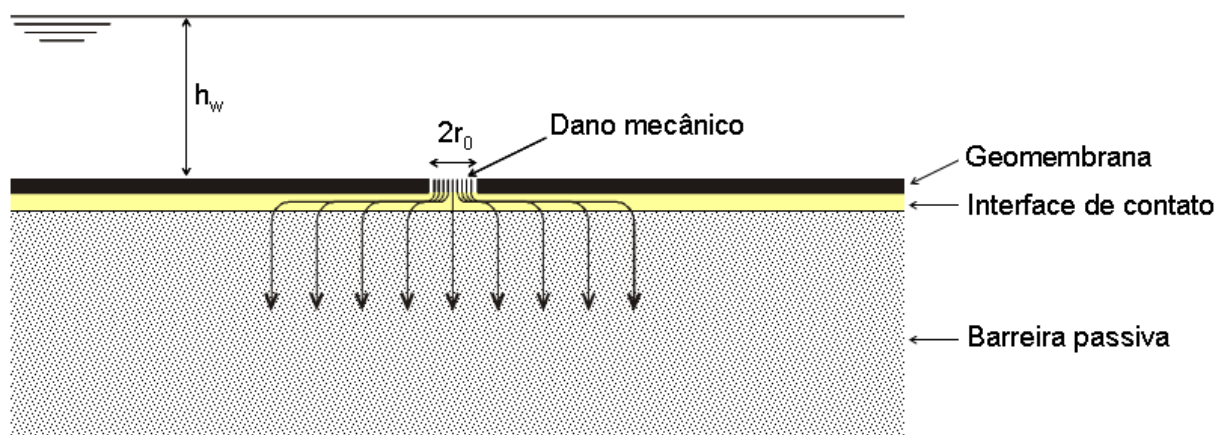


Figura 3.17 – Fluxo de líquido através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana.

O vazamento através do dano é essencialmente governado pela permeabilidade do material subjacente à geomembrana danificada e à transmissibilidade da interface de contato entre os materiais (Brown et al., 1987; Giroud & Bonaparte, 1989a; b). Para minimizar a perda de líquido através de um dano na geomembrana de uma barreira composta, é interessante, portanto, que a condição de contato entre a geomembrana e o material subjacente seja boa e que esse último tenha baixa condutividade hidráulica.

### ***Soluções analíticas***

A quantificação do vazamento de líquido através de uma barreira composta tem sido estudada analiticamente por diversos autores. Brown et al. (1987), Jayawickrama et al. (1988), Rowe (1998) e Touze-Foltz et al. (1999) desenvolveram soluções analíticas baseadas na lei de Darcy partindo do princípio de que a geomembrana não está em contato perfeito com o material subjacente e que há uma zona transmissível homogênea na interface de contato entre os materiais. Os autores apresentam equações para dois casos: (i) axi-simétrico, simulando a situação de um dano circular em uma geomembrana plana instalada sem rugas e (ii) bi-dimensional simulando a situação de dano de comprimento infinito ou dano em ruga da geomembrana (Figura 3.18).

No estudo de Touze-Foltz et al. (1999), tanto para o caso axi-simétrico quanto para o caso bi-dimensional, considera-se que: (i) o fluxo na interface está em regime permanente, (ii) o material subjacente (GCL ou CCL) e a fundação estão saturados e (iii) o fluxo de líquido através dos materiais subjacente e de fundação é vertical. Então, baseado na continuidade do

fluxo, a condutividade hidráulica equivalente,  $k_s$ , correspondente ao conjunto da barreira passiva (GCL ou CCL) e fundação é dada por (Rowe, 1998):

$$\frac{H_L + H_f}{k_s} = \frac{H_L}{k_L} + \frac{H_f}{k_f} \quad (3.11)$$

onde  $H_L$  e  $k_L$  são, respectivamente, a espessura e a condutividade hidráulica da camada subjacente à geomembrana (CCL ou GCL),  $H_f$  e  $k_f$  são, respectivamente, a espessura e a condutividade hidráulica da camada de fundação e  $k_s$  é a condutividade hidráulica da barreira passiva abaixo da geomembrana.

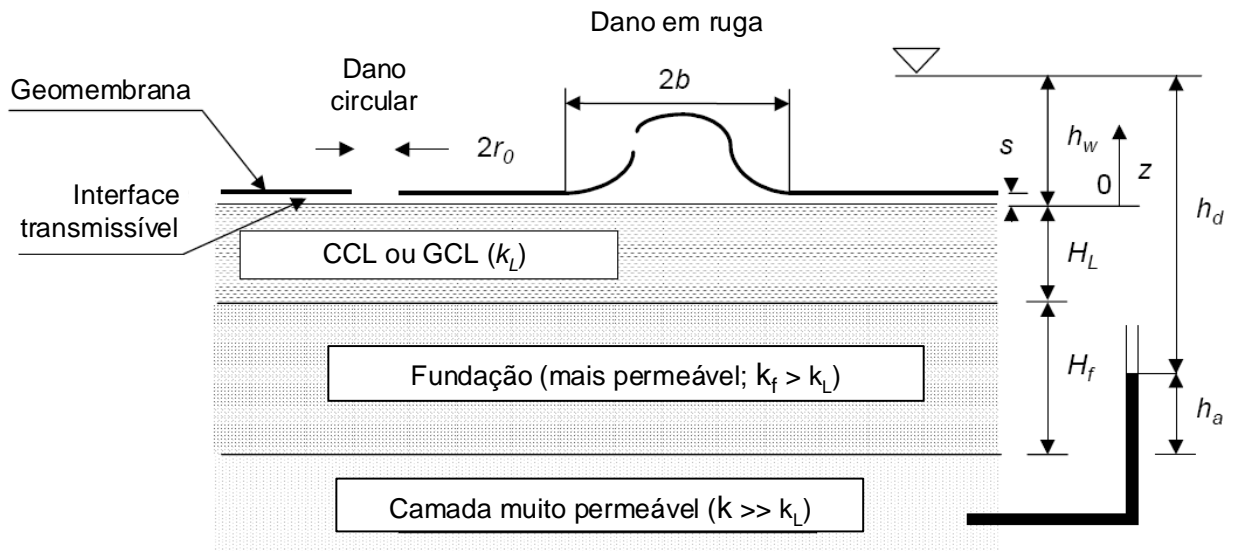


Figura 3.18 –Esquema da barreira composta (GCL e estrato subjacente) casos axi-simétrico e bidimensional (dano circular e dano em ruga, respectivamente) (modificado de Touze-Foltz et al., 1999).

Quando uma carga hidráulica  $h_w$  é aplicada sobre a barreira composta, o gradiente hidráulico médio máximo na barreira é calculado pela Equação 3.12:

$$i_s = 1 + \frac{h_w - h_a}{H_L + H_f} \quad (3.12)$$

onde  $i_s$  é o gradiente hidráulico na barreira composta,  $h_w$  e  $h_a$  são cargas hidráulicas sobre a geomembrana e no meio da camada muito permeável (subjacente à fundação, vide Figura 3.18), respectivamente, e  $H_L$  e  $H_f$  são as espessuras da camada subjacente à geomembrana (CCL ou GCL) e da camada de fundação, respectivamente.

Algumas considerações são específicas para o caso axi-simétrico. Assumindo-se que a transmissibilidade seja uniforme para o líquido que atravessa um dano na geomembrana de raio  $r_0$ , o fluxo ocorre de forma radial e, portanto, o problema é axi-simétrico. Como mostra a Figura 3.19, o sistema consiste em uma barreira composta formada por uma geomembrana com um dano central, com raio  $r_0$ , e um solo subjacente formando um cilindro de raio  $R_c$ , que pode ser o raio físico da célula de ensaio, no caso em laboratório, ou o raio virtual da área molhada nas condições de campo. Assumindo-se que o solo subjacente à geomembrana esteja saturado, as condições de contorno na interface transmissível em  $r = R_c$  estão ilustradas na Figura 3.19.

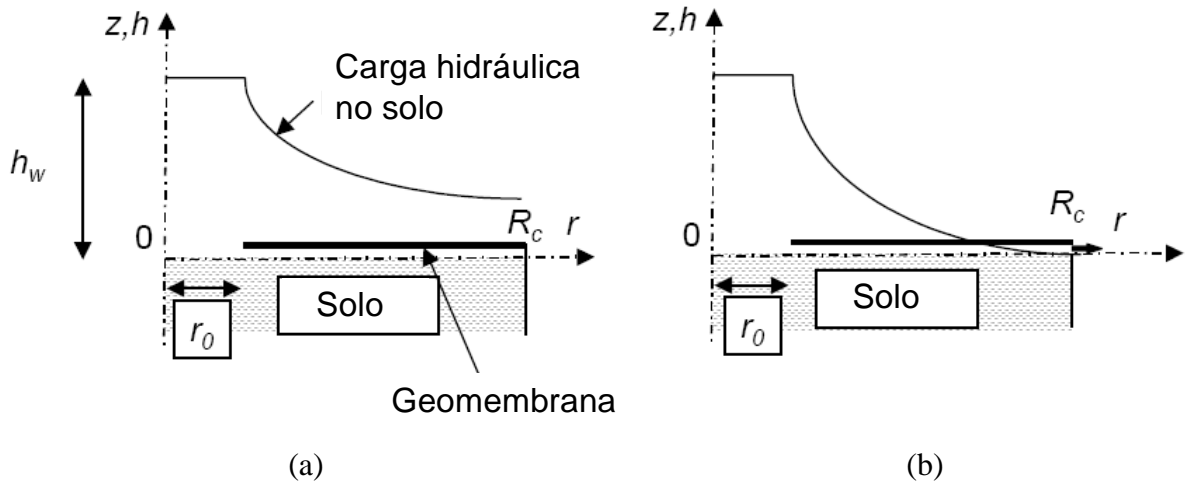


Figura 3.19 – Carga hidráulica na solo subjacente à geomembrana para o caso axi-simétrico com duas condições de contorno: (a) fluxo zero em  $r = R_c$  (b) carga hidráulica específica ( $h_s=0$ ) em  $r = R_c$  (Touze-Foltz et al., 1999).

Para a primeira condição de contorno, fluxo zero em  $r = R_c$  (Figura 3.19a), tem-se:

$$Q_r(R_c) = 0 \quad (3.13)$$

e, portanto:

$$h(R_c) \geq 0 \quad (3.14)$$

Para a segunda condição de contorno, carga hidráulica específica em  $r = R_c$  (Figura 3.19b), que é o caso dos ensaios da presente pesquisa, tem-se:

$$h(R_c) = h_s \quad (3.15)$$

e, portanto:

$$Q_r(R_c) \geq 0 \quad (3.16)$$

onde  $Q_r$  é a vazão radial do líquido na interface transmissível,  $h_s$  é a carga hidráulica específica na interface transmissível em  $r = R_c$  (onde  $r$  é o limite radial e  $h_s = 0$  na Figura 3.19b) e  $h$  é a carga hidráulica na interface transmissível.

De acordo com Brown et al. (1987), a equação que governa o fluxo radial de líquido através da interface transmissível até a distância  $r$  do dano circular,  $Q_r(r)$  é a seguinte:

$$Q_r(r) = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \theta \frac{dh}{dr} \quad (3.17)$$

Usando a lei de Darcy e assumindo-se que o solo esteja saturado, a vazão de líquido infiltrando no solo (CCL/GCL e fundação) entre  $r$  e  $r+dr$  é dada por:

$$dQ_s(r) = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot k_s \left( 1 + \frac{h - h_a}{H_f + H_L} \right) dr \quad (3.18)$$

A equação da conservação de massa possibilita que a vazão que passa pelo dano na geomembrana seja dividida entre a vazão que infiltra no solo subjacente e a que escoar radialmente pela interface transmissível (Brown et al., 1987):

$$\frac{d^2h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} - a^2h = a^2C \quad (3.19)$$

onde a carga hidráulica  $h$  na interface transmissível não é conhecida e  $a$  e  $C$  são dadas por (Rowe, 1998):

$$a = \sqrt{\frac{k_s}{(H_L + H_f) \cdot \theta}} \quad (3.20)$$

$$C = H_L + H_f - h_a \quad (3.21)$$

A solução geral da Equação 3.19 é dada por (Brown et al., 1987):

$$h(r) = AI_0(ar) + BK_0(ar) - C \quad \text{para } r_0 \leq r \quad (3.22)$$



onde  $K_0$  e  $I_0$  são funções de Bessel de ordem zero e  $A$  e  $B$  são constantes. As constantes  $A$  e  $B$  devem ser avaliadas e, portanto, uma segunda condição de contorno é necessária. Essa condição corresponde à carga hidráulica no furo da geomembrana,  $h_w$ :

$$h(r_0) = h_w \quad (3.23)$$

A Equação 3.22 pode ser então resolvida para  $r = R_c$  nas duas condições de contorno ilustradas pelas Figura 3.19a e b, como desenvolvido a seguir:

*Para o caso axi-simétrico onde  $Q_r = 0$  em  $r = R_c$  (Condição ilustrada na Figura 3.19a):*

Resolvendo a Equação 3.22 para as condições de contorno definidas pelas Equações 3.13 e 3.23, tem-se:

$$h(r) = A_Q I_0(ar) + B_Q K_0(ar) - C \quad (3.24)$$

onde

$$A_Q = \frac{(h_w + C) \cdot K_1(aR_c)}{K_1(aR_c) \cdot I_0(ar_0) + K_0(ar_0) \cdot I_1(aR_c)} \quad (3.25)$$

$$B_Q = \frac{(h_w + C) \cdot I_1(aR_c)}{K_1(aR_c) \cdot I_0(ar_0) + K_0(ar_0) \cdot I_1(aR_c)} \quad (3.26)$$

A Equação 3.24 é válida para qualquer  $r$  no intervalo  $r_0 \leq r \leq R_c$  desde que  $h(R_c) \geq 0$ .  $K_1$  e  $I_1$  são funções modificadas de Bessel de primeira ordem. A vazão total que atravessa o furo da geomembrana é a soma da vazão abaixo do dano circular ( $r \leq r_c$ ) com a vazão além das dimensões do dano circular ( $r_0 \leq r \leq R_c$ ):

$$Q = \pi \cdot r_0^2 \cdot k_s \cdot i_s - 2\pi \cdot r_0 \cdot \theta \cdot a \cdot [A_Q I_1(ar_0) - B_Q K_1(ar_0)] \quad (3.27)$$

*Para o caso axi-simétrico onde  $h = h_s$  em  $r = R_c$  (Condição ilustrada na Figura 3.19b):*

Resolvendo-se a Equação 3.22 para as condições de contorno definidas pelas Equações 3.27 e 3.23, tem-se:

$$h(r) = A_p I_0(ar) + B_p K_0(ar) - C \quad \text{para } r_0 \leq r \leq R_c \quad \text{e} \quad Q_r(R_c) \geq 0 \quad (3.28)$$

onde

$$A_p = - \frac{(h_w + C) \cdot K_0(aR_c) - (h_s + C) \cdot K_0(ar_0)}{K_0(ar_0) \cdot I_0(aR_c) - K_0(aR_c) \cdot I_0(ar_0)} \quad (3.29)$$

$$B_p = \frac{(h_w + C) \cdot I_0(aR_c) - (h_s + C) \cdot I_0(ar_0)}{K_0(ar_0) \cdot I_0(aR_c) - K_0(aR_c) \cdot I_0(ar_0)} \quad (3.30)$$

Para o caso específico em que  $h_s = 0$ , as Equações 3.29 e 3.30 se simplificam para:

$$A_p = - \frac{h_w K_0(aR_c) + C[K_0(aR_c) - K_0(ar_0)]}{K_0(ar_0) \cdot I_0(aR_c) - K_0(aR_c) \cdot I_0(ar_0)} \quad (3.31)$$

$$B_p = \frac{h_w I_0(aR_c) + C[I_0(aR_c) - I_0(ar_0)]}{K_0(ar_0) \cdot I_0(aR_c) - K_0(aR_c) \cdot I_0(ar_0)} \quad (3.32)$$

A vazão total que passa pelo furo da geomembrana,  $Q$ , é determinada a partir da Equação 3.33. Essa vazão é maior que a vazão que infiltra na barreira,  $Q_s$ , porque  $Q_r(R_c) > 0$ , a não ser que  $R_c = R_w$ . Expressões para a previsão de  $Q_r(R_c)$  e  $Q_s$  são apresentadas nas Equações 3.34 e 3.35, respectivamente.

$$Q = \pi \cdot r_0^2 \cdot k_s \cdot i_s - 2\pi \cdot r_0 \cdot \theta \cdot a \cdot [A_p I_1(ar_0) - B_p K_1(ar_0)] \quad (3.33)$$

$$Q_r(R_c) = -2\pi \cdot \theta \cdot a \cdot R_c [A_p I_1(aR_c) - B_p K_1(aR_c)] \quad (3.34)$$

$$Q_s = \pi \cdot r_0^2 \cdot k_s \cdot i_s - 2\pi \cdot \theta \cdot a \{ r_0 [A_p I_1(ar_0) - B_p K_1(ar_0)] - R_c [A_p I_1(aR_c) - B_p K_1(aR_c)] \} \quad (3.35)$$

As equações até aqui apresentadas (3.13 a 3.35) são aplicáveis ao caso axi-simétrico, que corresponde a um dano circular na geomembrana aplicada sem rugas sobre o material subjacente. O caso bi-dimensional corresponde a um dano em uma ruga de largura  $2b$  e comprimento  $L$  (com  $L \gg b$ ). Assumindo uniformidade da transmissibilidade da interface, o problema do fluxo torna-se bidimensional com o sistema equivalente a um paralelepípedo de largura  $2X_c$ , onde  $2X_c$  é a largura física da célula de ensaio no laboratório ou o raio virtual da área molhada nas condições de campo. As condições de contorno na interface transmissível em  $x = X_c$  estão ilustradas na Figura 3.20.

Para a primeira condição de contorno, fluxo zero em  $x = X_c$  (Figura 3.19a), tem-se:

$$Q_x(X_c) = 0 \quad (3.36)$$

e, portanto:

$$h(X_c) \geq 0 \quad (3.37)$$

Para a segunda condição de contorno, carga hidráulica específica em  $x = X_c$  (Figura 3.19b), tem-se:

$$h(X_c) = h_s \quad (3.38)$$

e, portanto:

$$Q_x(X_c) \geq 0 \quad (3.39)$$

onde  $Q_x$  é a vazão radial do líquido na interface transmissível na direção normal ao eixo da ruga,  $h_s$  é a carga hidráulica específica na interface transmissível em  $x = X_c$  ( $h_s = 0$  na Figura 3.19b) e  $x$  é o limite horizontal.

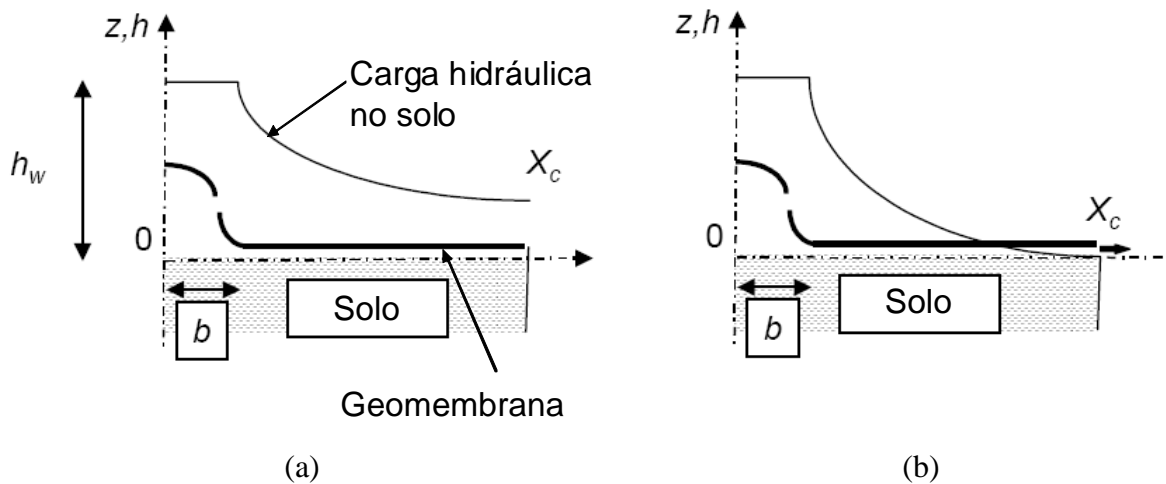


Figura 3.20 - Carga hidráulica na solo subjacente à geomembrana para o caso bi-dimensional com duas condições de contorno: (a) fluxo zero em  $x = X_c$  (b) carga hidráulica específica ( $h_s=0$ ) em  $x = X_c$  (Touze-Foltz et al., 1999).

Por analogia ao caso axi-simétrico, a equação que governa o fluxo de líquido através da interface transmissível em um dos lados da ruga até a distância  $x$  partindo do meio da ruga,  $Q_x(x)$ , é a seguinte:

$$Q_x(x) = -L\theta \frac{dh}{dx} \quad (3.40)$$

Usando a lei de Darcy e assumindo-se que o solo esteja saturado, a vazão de líquido infiltrando no solo na faixa entre  $x$  e  $x+dx$  em um lado da ruga é dada por:

$$dQ_s(x) = k_s \left( 1 + \frac{h - h_a}{H_f + H_L} \right) L dx \quad (3.41)$$

Usando o mesmo princípio de diferenciação da equação da conservação de massa usado para o caso axi-simétrico, Rowe (1998) obteve a seguinte equação diferencial para a carga hidráulica na interface transmissível:

$$\frac{d^2 h}{dx^2} - a^2 h = a^2 C \quad (3.42)$$

onde  $a$  e  $C$  são dados pelas Equações 3.20 e 3.21, respectivamente.

A solução geral da Equação 3.42 é dada por:

$$h(x) = E \exp(-ax) + F \exp(ax) - C \quad \text{para } b \leq r \quad (3.43)$$

onde  $E$  e  $F$  são coeficientes que dependem das condições de contorno. Como para o caso axi-simétrico, duas condições de contorno são necessárias para solucionar a Equação 3.54 e avaliar os coeficientes  $E$  e  $F$ . A primeira condição consiste na carga hidráulica do líquido no dano da geomembrana:

$$h(b) = h_w \quad (3.44)$$

A outra condição de contorno pode ser dada por uma das duas condições ilustradas nas Figura 3.20a e b. As soluções para cada uma dessas condições estão descritas a seguir.

*Para o caso bi-dimensional onde  $Q_x = 0$  em  $x = X_c$  (Condição ilustrada na Figura 3.20a)*

Resolvendo a Equação 3.42 para as condições de contorno dadas pelas Equações 3.36, 3.37 e 3.44, a seguinte equação para a carga hidráulica sob a geomembrana é obtida:

$$h(x) = \frac{(h_w + C) \cosh[a(X_c - x)]}{\cosh[a(X_c - b)]} - C \quad \text{Para } b \leq x \leq X_c \quad \text{e} \quad h(X_c) \geq 0 \quad (3.45)$$

Ainda usando o princípio de conservação de massa, a vazão total é igual à parcela que infiltra no solo e, assumindo que a transmissibilidade de contato na interface seja igual dos dois lados da ruga, tem-se:

$$Q = 2 \cdot L \cdot k_s \cdot i_s \left( b + \frac{1}{a} \tanh[a(X_c - b)] \right) \quad (3.46)$$

Para o caso bi-dimensional onde  $h = h_s$  em  $x = X_c$  (Condição ilustrada na Figura 3.20b)

Resolvendo a Equação 3.43 para as condições de contorno dadas pelas Equações 3.38, 3.39 e 3.44, tem-se:

$$h(x) = \frac{(h_w + C) \sinh[a(X_c - x)] - (h_s + C) \sinh[a(b - x)]}{\sinh[a(X_c - b)]} - C \quad (3.47)$$

$$\text{Para } b \leq x \leq X_c \quad \text{e} \quad Q_x(X_c) \geq 0$$

A vazão total que passa pelo furo da geomembrana,  $Q$ , consiste na soma da vazão que infiltra no solo,  $Q_s$ , com a vazão que escoar pela interface  $Q_x(X_c)$ , que podem ser determinadas a partir das Equações a seguir:

$$Q = 2 \cdot L \cdot k_s \left\{ bi_s + \frac{(h_w + C) \cdot \cosh[a(X_c - b)] - (h_s + C)}{a(H_L + H_f) \cdot \sinh[a(X_c - b)]} \right\} \quad (3.48)$$

$$Q_s = 2 \cdot L \cdot k_s \left\{ bi_s + \frac{(h_w + h_s + 2C) \cdot \{\cosh[a(X_c - b)] - 1\}}{a(H_L + H_f) \cdot \sinh[a(X_c - b)]} \right\} \quad (3.49)$$

$$Q_x(X_c) = 2 \cdot L \cdot k_s \left\{ \frac{h_w + C - (h_s + C) \cdot \cosh[a(X_c - b)]}{a(H_L + H_f) \cdot \sinh[a(X_c - b)]} \right\} \quad (3.50)$$

### 3.2.2 TRANSMISSIBILIDADE DA INTERFACE VERSUS QUALIDADE DE CONTATO

O vazamento através de um furo na geomembrana de uma barreira composta depende da transmissibilidade da interface de contato entre a geomembrana e o material subjacente que, por sua vez, depende da qualidade de contato entre as superfícies (Brown et al., 1987). Nesse contexto, Giroud (1997) definiu o que seriam as condições de contato ruim e boa e, posteriormente, Touze-Foltz & Giroud (2003) adicionaram o conceito de condição de contato excelente. As definições qualitativas dessas três condições estão sumariadas abaixo.

- Condição de contato ruim: consiste em uma geomembrana instalada com certo número de rugas e/ou instalada sobre um solo de baixa permeabilidade mal compactado e de superfície rugosa (Giroud, 1997);
- Condição de contato boa: consiste em uma geomembrana instalada com o menor número de rugas possível sobre um solo de baixa permeabilidade bem compactado com superfície lisa e tensão confinante suficiente para garantir o contato entre a geomembrana e o solo subjacente (Giroud, 1997);
- Condição de contato excelente: consiste em uma geomembrana instalada sem rugas sobre um geocomposto bentonítico (GCL) que por sua vez está em contato íntimo com um solo de baixa permeabilidade compactado adequadamente e com uma superfície muito lisa. Considera-se que a pressão confinante é suficiente para manter um bom contato entre a geomembrana e o GCL (Touze-Foltz & Giroud, 2003).

Para cada condição de contato foi desenvolvida uma equação empírica que relaciona a transmissibilidade da interface,  $\theta$ , com a condutividade hidráulica do material subjacente à geomembrana,  $k_s$ . Rowe (1998) propôs equações para o cálculo da transmissibilidade de interfaces de contato sob condições boa e ruim. Utilizando resultados obtidos em ensaios de Brown et al. (1987) e extrapolações obtidas por Navarro (1999), Touze-Foltz & Giroud (2003) propuseram uma terceira equação, para condição de contato excelente. As equações de previsão da transmissibilidade da interface em função da permeabilidade do material subjacente para cada condição de contato descrita estão apresentadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Equações empíricas de previsão da transmissibilidade da interface.

Condição de contato	Equações	Autores
Ruim	$\log \theta = 1.15 + 1.092 \log k_s + 0.0207 (\log k_s)^2$	(Rowe, 1998)
Boa	$\log \theta = 0.07 + 1.036 \log k_s + 0.018 (\log k_s)^2$	(Rowe, 1998)
Excelente	$\log \theta = -0.321 + 1.036 \log k_s + 0.018 (\log k_s)^2$	(Touze-Foltz & Giroud, 2003)

Notas:  $\theta$  é a transmissibilidade da interface e  $k_s$  é a condutividade hidráulica do material subjacente à geomembrana. As equações apresentadas só podem ser usadas com  $\theta$  em (m<sup>2</sup>/s) e  $k_s$  em (m/s).

Touze-Foltz & Giroud (2003) verificaram que uma boa aproximação das equações apresentadas na Tabela 3.1 pode ser obtida por equações lineares paralelas entre si, que mal se distinguem das curvas das equações originais. Baseando no paralelismo entre as retas que relacionam  $\theta$  e  $k_s$  para as condições de contato ruim, boa e excelente, Touze-Foltz & Barroso (2006) propuseram uma quarta equação, específica para a condição de contato GM-GCL. Para isso, foram calculadas, por meio de solução analítica proposta por Touze-Foltz et al. (1999), as transmissibilidades da interface GM-GCL baseadas em vazões na interface obtidas em ensaios de laboratório. Os valores de transmissibilidade obtidos foram plotados em função da condutividade hidráulica. Uma reta paralela às retas que definem as equações para condições de contato ruim, boa e excelente, foi traçada passando pelo ponto de maior transmissibilidade determinada para a interface GM-GCL, como mostra a Figura 3.21, definindo-se assim a equação para condição de contato GM-GCL. A Tabela 3.2 apresenta as equações lineares obtidas por aproximações das Equações empíricas previamente apresentadas na Tabela 3.1, bem como a equação para a condição de contato GM-GCL.

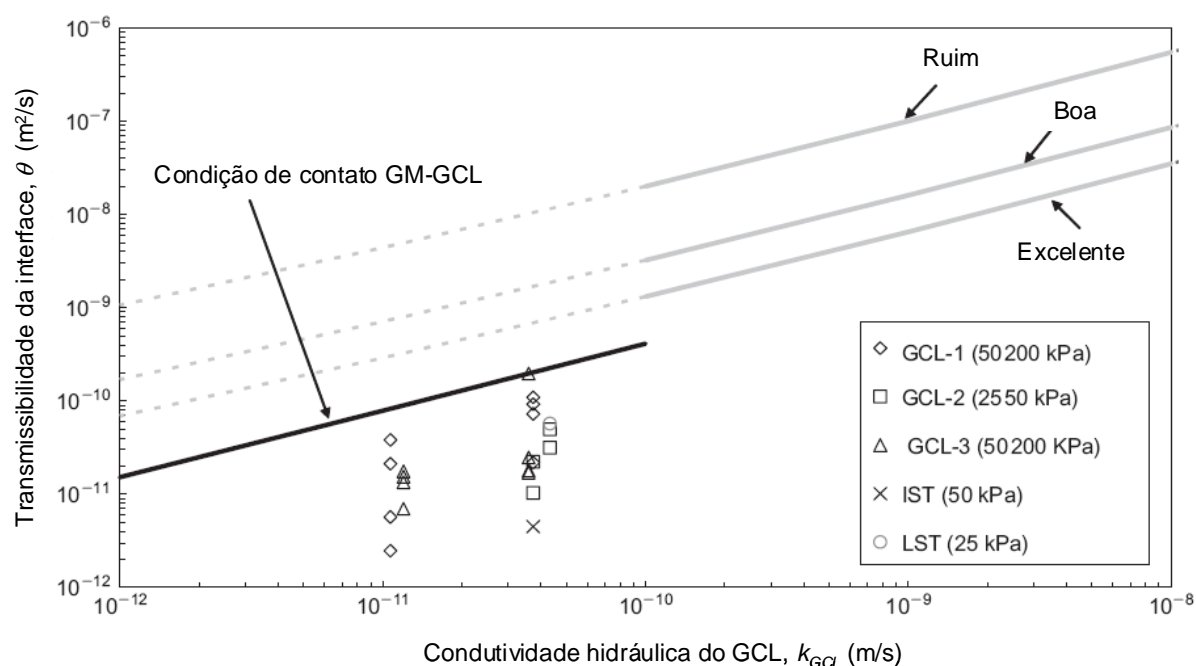


Figura 3.21 – Transmissibilidade da interface versus condutividade hidráulica do GCL para condições de contato ruim, boa, excelente e GM-GCL (Touze-Foltz & Barroso 2006).

Tabela 3.2 – Aproximações lineares das equações empíricas de previsão da transmissibilidade da interface.

Condição de contato	Equações	Autores
Pobre	$\log \theta = -0.5618 + 0.7155 \cdot \log k_s$	(Touze-Foltz & Giroud, 2003)
Boa	$\log \theta = -1.3564 + 0.7155 \cdot \log k_s$	
Excelente	$\log \theta = -1.7476 + 0.7155 \cdot \log k_s$	
GM-GCL	$\log \theta = -2.2322 + 0.7155 \cdot \log k_{GCL}$	(Touze-Foltz & Barroso, 2006)

Notas:  $\theta$  é a transmissibilidade da interface e  $k_s$  é a condutividade hidráulica do material subjacente à geomembrana. As equações apresentadas só podem ser usadas com  $\theta$  em ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) e  $k_s$  em (m/s).

### 3.2.3 EQUAÇÕES EMPÍRICAS PARA O CÁLCULO DA VAZÃO ATRAVÉS DE DANO NA GEOMEMBRANA

A partir dos resultados obtidos por Brown et al. (1987) e baseando-se numa extensa análise bidimensional usando métodos numéricos feita por Faure (1979) do vazamento através de uma barreira composta devido a um furo na geomembrana, Giroud & Bonaparte (1989) e



Giroud et al. (1989) propuseram equações empíricas para o cálculo da vazão através de um furo na geomembrana em função da carga hidráulica sobre a geomembrana,  $h_w$ , da área do furo,  $a$  e da condutividade hidráulica do solo subjacente à geomembrana,  $k_s$ . Essas equações eram válidas para gradientes hidráulicos próximos de 1, que corresponde à situação em que a carga hidráulica sobre a geomembrana é pequena comparada à espessura do solo subjacente, situação tipicamente encontrada no fundo de aterros sanitários onde a carga hidráulica varia de 0,03 a 0,3 m e a espessura de solo subjacente pode ter 0,6 a 0,9 m. Posteriormente, Giroud (1997) estendeu o estudo anterior para propor equações de previsão da vazão em situações onde o gradiente hidráulico fosse maior que 1, ou seja, a carga hidráulica sobre a geomembrana não é pequena comparada à espessura do solo subjacente (o que pode ocorrer em aterros sanitário com o sistema de drenagem de chorume comprometido, segundo Rowe, 1998; 2005).

Com base em estudos anteriores, Giroud et al. (1992) propuseram equações empíricas para o cálculo da vazão através de danos longitudinais de comprimento infinito. Para isso, assumiram que a área molhada tinha largura igual ao diâmetro da área molhada devido a um furo na geomembrana (considerando o diâmetro do furo igual à largura do dano longitudinal). Foose et al. (2001) e Touze-Foltz (2001), ao compararem os resultados das equações empíricas com os de soluções analíticas, verificaram inconsistências nas equações de previsão da vazão através de dano longitudinal, ao contrário das equações para previsão da vazão em danos circulares (que apresentaram boa concordância com as soluções analíticas). Foose et al. (2001) atribuíram essa inconsistência à uma diferença das transmissibilidades da interface entre a geomembrana e o solo subjacente correspondentes às equações para o dano circular e dano longitudinal. No entanto, as mesmas condições de contato haviam sido consideradas por Giroud et al. (1992) e, conceitualmente, a transmissibilidade é um parâmetro que não depende de dano na geomembrana. Baseado nessa inconsistência, Foose et al. (2001) realizaram um estudo numérico usando o método dos elementos finitos para propor outras equações empíricas de previsão da vazão através de um dano longitudinal na geomembrana.

Baseando-se nas condições de contato entre a geomembrana e o material subjacente e nas transmissibilidades da interface obtidas para cada condição de contato, Touze-Foltz & Giroud (2003), assumindo que a transmissibilidade é independente do tipo de dano na geomembrana, fizeram uma atualização das equações de previsão da vazão para danos longitudinais e dano em rugas da geomembrana, além de adicionar uma equação para danos circulares em

condição de contato excelente, proposta pelos autores. As equações propostas até então não contemplavam os danos circulares de grandes diâmetros: a equação de Giroud (1997) para condição de contato ruim, bem como as equações de Touze-Foltz & Giroud (2003) para condições de contato boa e excelente, tinham aplicabilidade limitada a danos circulares de diâmetros entre 2 e 20 mm. Touze-Foltz & Giroud (2005) ampliaram esses estudos propondo equações para danos circulares de maior dimensão, abrangendo diâmetros entre 100 e 600 mm.

Touze-Foltz & Barroso (2006) verificaram que a condição de contato entre uma geomembrana e um GCL pode ser melhor que a condição de contato excelente definida por Touze-Foltz & Giroud (2003). Surgiu então a necessidade de definir equações que contemplassem a qualidade de contato GM-GCL. Equações empíricas para a previsão da vazão através de barreiras compostas envolvendo um GCL foram desenvolvidas por Touze-Foltz & Barroso (2006) para o caso de danos circulares.

A Tabela 3.3 sumaria as Equações empíricas de previsão da vazão através de dano circular (pequeno ou grande), dano longitudinal (corresponde a rasgos, cortes, falhas nas soldas, etc) e dano em ruga na geomembrana. Cada equação depende da condição de contato da interface entre a geomembrana e o material subjacente, que pode ser um GCL (condição de contato GM-GCL) ou um solo (condições de contato excelente, boa ou ruim).

De acordo com os limites de validade apresentados por Touze-Foltz & Giroud (2003), verifica-se que as equações não são aplicáveis a barreiras compostas de apenas uma geomembrana e um GCL subjacente. Mas podem ser aplicáveis a situações em que a barreira passiva é composta por um GCL e uma camada de argila compactada subjacente. Além disso, as equações para danos longitudinais e dano em rugas consideram apenas o fluxo normal à direção longitudinal do dano e, portanto, devem ser usadas para situações onde a razão entre o comprimento e a largura do dano seja grande (50, de acordo com cálculos preliminares de Touze-Foltz & Giroud, 2003).

Tabela 3.3 – Equações empíricas disponíveis para o cálculo da vazão através de uma barreira composta devido a um dano na geomembrana (Touze-Foltz et al., 2008).

Tipo de dano	Condições de contato*	Equações empíricas	Autores
Circular ( $2 \leq \phi \leq 20$ mm)	GM-GCL	$Q = 2.4 \times 10^{-3} h_w^{0.9} a^{0.1} k_s^{0.74} [1 + 0.1(h_w/H_s)^{0.95}]$	Touze-Foltz & Barroso (2006)
	Excelente	$Q = 0.096 h_w^{0.9} a^{0.1} k_s^{0.74} [1 + 0.1(h_w/H_s)^{0.95}]$	Touze-Foltz & Giroud (2003)
	Boa	$Q = 0.21 h_w^{0.9} a^{0.1} k_s^{0.74} [1 + 0.1(h_w/H_s)^{0.95}]$	Giroud (1997)
	Ruim	$Q = 1.15 h_w^{0.9} a^{0.1} k_s^{0.74} [1 + 0.1(h_w/H_s)^{0.95}]$	
Circular ( $100 \leq \phi \leq 600$ mm)	GM-GCL	$Q = 0.116 h_w^{0.54} a^{0.4} k_s^{0.82} [1 - 0.22(h_w/H_s)^{-0.35}]$	Touze-Foltz & Barroso (2006)
	Excelente	$Q = 0.33 h_w^{0.84} a^{0.18} k_s^{0.77} [1 - 0.1(h_w/H_s)^{0.027}]$	Touze-Foltz & Giroud (2005)
	Boa	$Q = 0.64 h_w^{0.84} a^{0.18} k_s^{0.77} [1 - 0.1(h_w/H_s)^{0.027}]$	
	Ruim	$Q = 2.604 h_w^{0.84} a^{0.18} k_s^{0.77} [1 - 0.1(h_w/H_s)^{0.027}]$	
Longitudinal ( $2 \leq 2b \leq 20$ mm)	Excelente	$Q_L = 0.42 h_w^{0.45} b^{0.004} k_s^{0.87} [1 + 0.52(h_w/H_s)^{0.59}]$	Touze-Foltz & Giroud (2003)
	Boa	$Q_L = 0.65 h_w^{0.45} b^{0.004} k_s^{0.87} [1 + 0.52(h_w/H_s)^{0.59}]$	
	Ruim	$Q_L = 1.64 h_w^{0.45} b^{0.004} k_s^{0.87} [1 + 0.52(h_w/H_s)^{0.59}]$	
	Todas**	$Q_L = \frac{2}{H_s} \left( \frac{b}{2} + \sqrt{\frac{\theta \cdot H_s}{k_s}} \right) \cdot (h_s + H_s) \cdot k_s$	Foose et al. (2001)
Dano em ruga ( $100 \leq 2b \leq 600$ mm)	Excelente	$Q_L = 0.63 h_w^{0.45} b^{0.1} k_s^{0.87} [1 + 0.28(h_w/H_s)^{0.82}]$	Touze-Foltz & Giroud (2003)
	Boa	$Q_L = 0.89 h_w^{0.45} b^{0.1} k_s^{0.87} [1 + 0.28(h_w/H_s)^{0.82}]$	
	Ruim	$Q_L = 1.98 h_w^{0.45} b^{0.1} k_s^{0.87} [1 + 0.28(h_w/H_s)^{0.82}]$	

Notas:  $Q$  é a vazão;  $Q_L$  é a vazão por unidade de comprimento;  $h_w$  é a carga hidráulica sobre a geomembrana;  $a$  é a área do dano circular;  $2b$  é a largura do dano longitudinal ou da ruga com dano;  $k_s$  é a condutividade hidráulica do solo subjacente;  $H_s$  é a espessura do solo subjacente;

\*Condições de contato definidas no item 3.2.2;

\*\*Equação aplicável se a razão entre a condutividade hidráulica da interface e do solo compondo a barreira composta seja maior que  $3 \times 10^4$ , que é o caso do intervalo de parâmetros considerados nas demais equações.

### **3.2.4 PESQUISAS SOBRE O TRANSPORTE ADVECTIVO DE LÍQUIDOS ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS**

Algumas pesquisas anteriores investigaram os fatores mais importantes que influenciam a vazão através de um dano na geomembrana sobrejacente a um GCL em uma barreira composta. Este item apresenta a descrição das pesquisas de laboratório desenvolvidas nesse sentido.

Estornell & Daniel (1992) estudaram o vazamento de água através de barreira composta GM-GCL. A barreira ativa consistia em uma geomembrana de HDPE de 1,5 mm de espessura. Para compor a barreira passiva foram estudados 3 GCLs. O primeiro consistia em bentonita combinada a uma geomembrana, o segundo era agulhado e o terceiro era ligado por adesivo. A geomembrana da barreira ativa era submetida a dois danos circulares de 75 mm de diâmetro, três danos circulares com 25 mm de diâmetro e três rasgos com 0,6 m de comprimento e aproximadamente 1 mm de largura. Na célula do equipamento as camadas eram, do topo para a base: camada granular, geomembrana danificada, GCL e camada drenante subjacente. A pressão confinante variava de 8 a 10 kPa e a carga hidráulica era constante durante todo o ensaio, igual a 0,3 m. Entre os principais resultados obtidos, os autores reportaram que não foi observado fluxo na barreira composta com o primeiro GCL (bentonita ligada a uma geomembrana) durante os 5 meses de duração do ensaio. A água que atravessava a geomembrana danificada infiltrava na bentonita do GCL formando uma área molhada com raio de 75 mm. Os autores atribuíram esse comportamento à selagem dos danos na geomembrana pela bentonita. Nos ensaios com GCLs compostos por geotêxteis, algum vazamento foi verificado depois de 3 meses de ensaio. Observou-se que a bentonita estava completamente hidratada em toda sua extensão, sugerindo que a água que passava através dos danos escoava lateralmente através do geotêxtil superior do GCL e então infiltrava no mesmo. Os autores concluíram que a eficiência do GCL subjacente à geomembrana danificada está ligada à existência ou não de geotêxtil superior (componente do GCL) em contato direto com a geomembrana.

Harpur et al. (1993) mediram a vazão de líquido na interface de contato entre uma geomembrana danificada (dano circular de 7,6 mm de diâmetro) e o GCL subjacente com o intuito de quantificar a transmissibilidade da interface GM-GCL. A Figura 3.22 mostra

esquemáticamente o permeâmetro usado nos ensaios, cujo diâmetro era de 108 mm. As pressões verticais aplicadas eram de 7 ou 70 kPa. Uma carga hidráulica constante de 0,3 m era aplicada para a medida da vazão da interface. A duração dos ensaios era de duas semanas. Foram estudados 5 GCLs diferentes, variando os tipos de geossintéticos que compunham os GCLs (geomembrana ou geotêxteis tecidos ou não tecidos), tipo de ligação do GCL (costura, agulhagem ou colagem) e também o tipo de bentonita (granulada ou em pó). Não era feita a pré-hidratação dos GCLs antes dos ensaios.

Os valores de transmissibilidade determinados foram chamados de “transmissibilidade aparente” visto que a infiltração de água no GCL foi desconsiderada. Os autores consideraram que a transmissibilidade aparente corresponde ao limite superior da transmissibilidade real da interface entre GM-GCL. As transmissibilidades variaram de  $6 \times 10^{-12}$  e  $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  nos ensaios usando GCL compostos por bentonita encapsulada entre dois geotêxteis. No GCL composto por bentonita colada à geomembrana, a transmissibilidade ficou em torno de  $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Os resultados mostram uma redução significativa da transmissibilidade aparente com o tempo, devido à hidratação e expansão da bentonita durante o ensaio. Maiores transmissibilidades aparentes iniciais foram obtidas nos ensaios submetidos à menor pressão confinante (7 kPa).

Quanto aos diferentes tipos de GCL, os menores valores de transmissibilidade de interface foram obtidos com GCLs compostos por bentonita granular colada a uma geomembrana, uma vez que não havia geotêxtil em contato com a geomembrana danificada. Comparações entre GCLs compostos de bentonita granular ou em pó (mantendo-se os mesmos geotêxteis de cobertura e de suporte compondo os GCLs) indicaram melhor desempenho da bentonita em pó. O único GCL estudado por estes autores que apresentava um geotêxtil não tecido na cobertura (superfície drenante em contato com a geomembrana danificada) apresentou valores de transmissibilidade da mesma ordem de grandeza que os valores dos outros materiais estudados. Uma vez que a geomembrana danificada estava em contato direto com um geotêxtil não tecido (material drenante), esperava-se que a transmissibilidade fosse maior nesse caso, o que não ocorreu devido à impregnação da bentonita em pó no geotêxtil de cobertura.

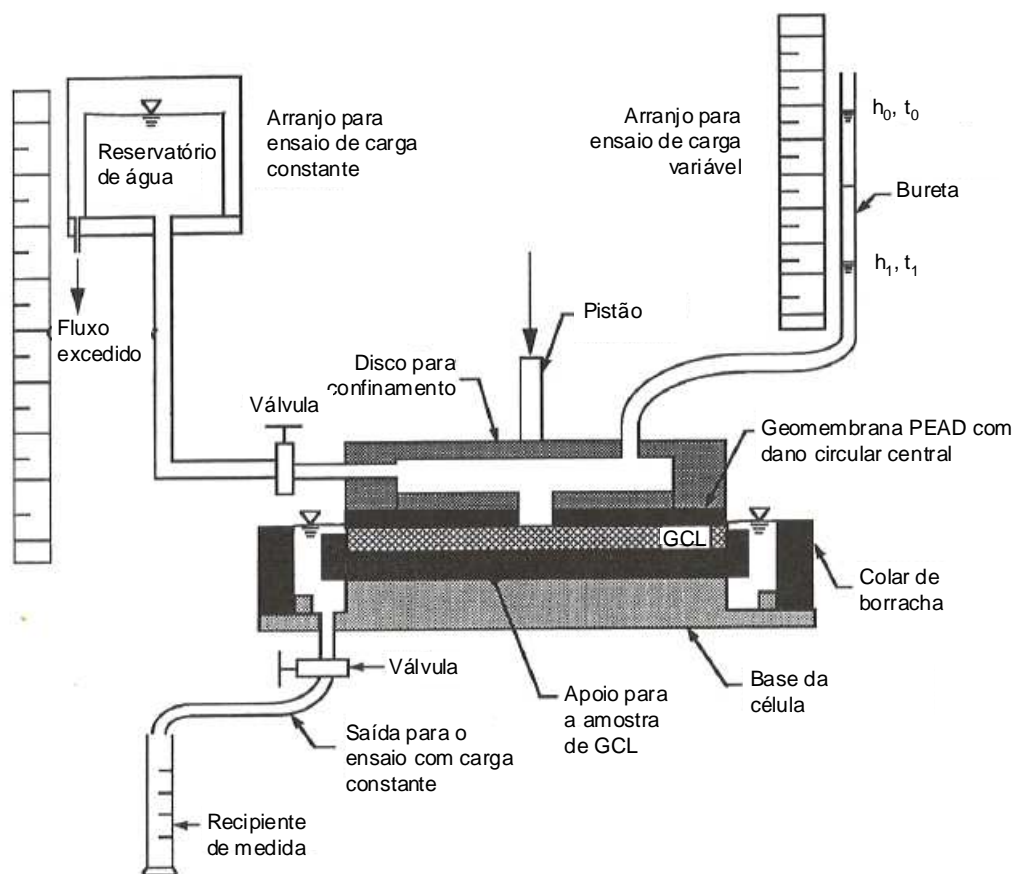


Figura 3.22 – Equipamento para medida de vazão através de barreira composta GM-GCL (Harpur et al., 1993).

Koerner & Koerner (2002) fizeram ensaios de fluxo através de barreiras compostas em uma situação particular: considerando que a agulha do processo de agulhagem de GCLs pode se quebrar durante a fabricação e permanecer dentro do GCL, essa pode ser a origem de danos nos materiais adjacentes ao GCL no campo, como a geomembrana. Nos ensaios conduzidos pelos autores a geomembrana era submetida a quatro tipos de danos: furo de 0,1 mm de diâmetro simulando a perfuração pela agulha; furo de 0,1 mm sem a retirada da agulha perfurante e danos circulares de 1 mm ou 3,6 mm de diâmetro. Além dos ensaios com a barreira composta GM-GCL, ensaios com a geomembrana sobrejacente a uma georede também foram conduzidos para comparação com os resultados obtidos nos ensaios utilizando GCL. O permeâmetro era partido em quatro setores para que os quatro tipos de dano fossem ensaiados ao mesmo tempo. A tensão confinante utilizada era de 35 kPa e cargas hidráulicas de 25 a 600 mm eram aplicadas sucessivamente. Os GCLs eram previamente imersos em água durante 7 dias para hidratação sob pressão confinante. Os ensaios eram encerrados quando três critérios eram atingidos: (i) a vazão de infiltração estivesse entre 2,8 e 4,7 l/h ( $7,8 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ) para as três últimas leituras; (ii) nenhuma tendência de

aumento ou redução da vazão fosse notada nas últimas três leituras; (iii) as três últimas leituras estivessem entre 0,75 e 1,25 vezes o valor médio da vazão. As vazões foram plotadas em função da carga hidráulica. Os resultados mostraram que para os quatro danos mecânicos estudados, o vazamento na barreira composta GM-GCL foi de 4 a 5 vezes menor que o vazamento no caso da geomembrana instalada sobre a georrede. Comparando o vazamento para cada tipo de dano, a maior vazão foi observada no dano de 0,1 mm com agulha e as vazões nos demais tipos de dano foram similares, aproximadamente iguais a  $3 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$ . Observou-se também que a vazão aumentava gradativamente com o aumento da carga hidráulica.

O vazamento através de barreiras compostas GM-GCL-CCL foi também estudado por Barroso (2005) e Barroso et al. (2006), que conduziram ensaios de laboratório em três escalas: pequena, intermediária e grande. No equipamento de ensaio em pequena escala (Figura 3.23), com diâmetro de 0,2 m, a pressão confinante era de 25, 50 ou 200 kPa e cargas hidráulicas de 0,3 ou 1,2 m. O equipamento em escala intermediária tinha diâmetro de 1 m (Figura 3.24). Um único ensaio foi executado nesse equipamento, com pressão confinante de 50 kPa e carga hidráulica de 0,3 m. O ensaio em grande escala foi executado numa caixa quadrada de 2,2 m de lado (Figura 3.25) com pressão confinante de 25 kPa e carga hidráulica de 0,3 m. Em todos os ensaios era feita a medida do vazamento de água através de uma barreira composta pelas seguintes camadas (do topo para a base): camada granular, geotêxtil de proteção (salvo no ensaio de pequena escala), geomembrana danificada, GCL e CCL. A geomembrana usada era de HDPE de 2 mm de espessura com dano de 3 mm de diâmetro. Foram testados 3 tipos de GCLs, variando-se o tipo de bentonita (sódica natural granular ou em pó e cálcica ativada granular), os geotêxteis que compunham o GCL e o tipo de fabricação dos GCL. Foram usados dois solos diferentes para compor a camada de argila compactada, CCL, subjacente ao GCL. Quando compactados na umidade ótima do Proctor modificado o solo S1 apresentava condutividades hidráulicas de  $8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$  e S2 de  $3 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ .

Os resultados mostraram que é difícil estabelecer tendências gerais que expressem a influência da pré-hidratação, pressão confinante e carga hidráulica. Nos ensaios em pequena escala, verificou-se que a pressão de confinamento influencia o fluxo de forma diferente, dependendo da umidade inicial do GCL: o fluxo em GCLs pré-hidratados é cerca de uma ordem de grandeza maior em ensaios sob 50 kPa de pressão confinante que sob 200 kPa (Figura 3.26). No entanto, para amostras não pré-hidratadas as vazões são similares para

ambas as pressões de confinamento durante o regime permanente de fluxo. Como observado por Palmeira & Gardoni (2000; 2002) e Gardoni & Palmeira (2002), a pressão confinante e a impregnação dos geotêxteis podem influenciar a permissividade e a transmissibilidade do geotêxtil de cobertura do GCL. Com relação à carga hidráulica, verificou-se aumento da vazão com o aumento da carga hidráulica.

Os resultados dos ensaios em escala intermediária e grande, executados com pressões confinantes de 50 e 25 kPa, respectivamente, mostraram que para as condições ensaiadas nesse estudo, as vazões observadas nos ensaios em pequena escala representam o limite superior do vazamento que seria observado sob condições de campo. Os resultados obtidos também sugerem que a transmissibilidade da interface de contato entre a geomembrana e o GCL não é uniforme.

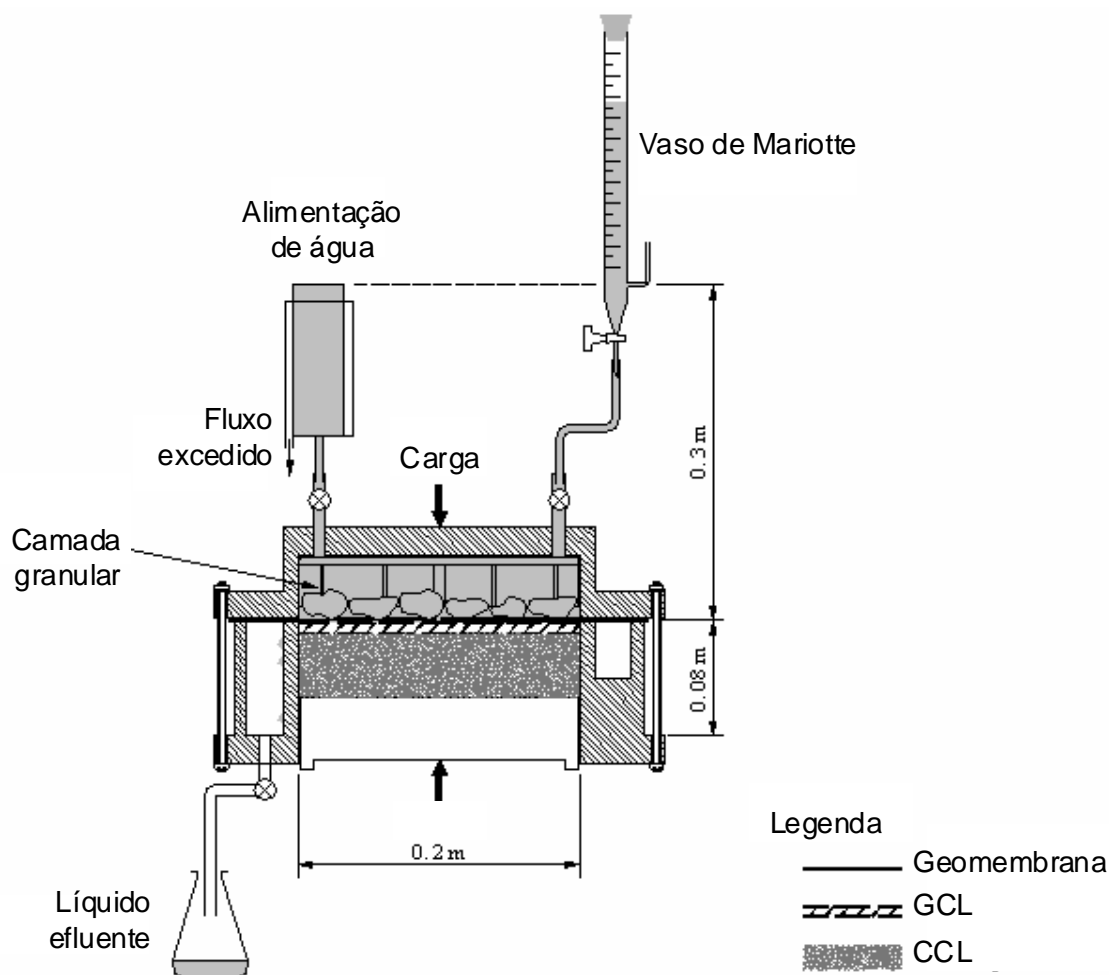


Figura 3.23 – Equipamento em pequena escala para medida de vazão através da interface GM-GCL (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006).



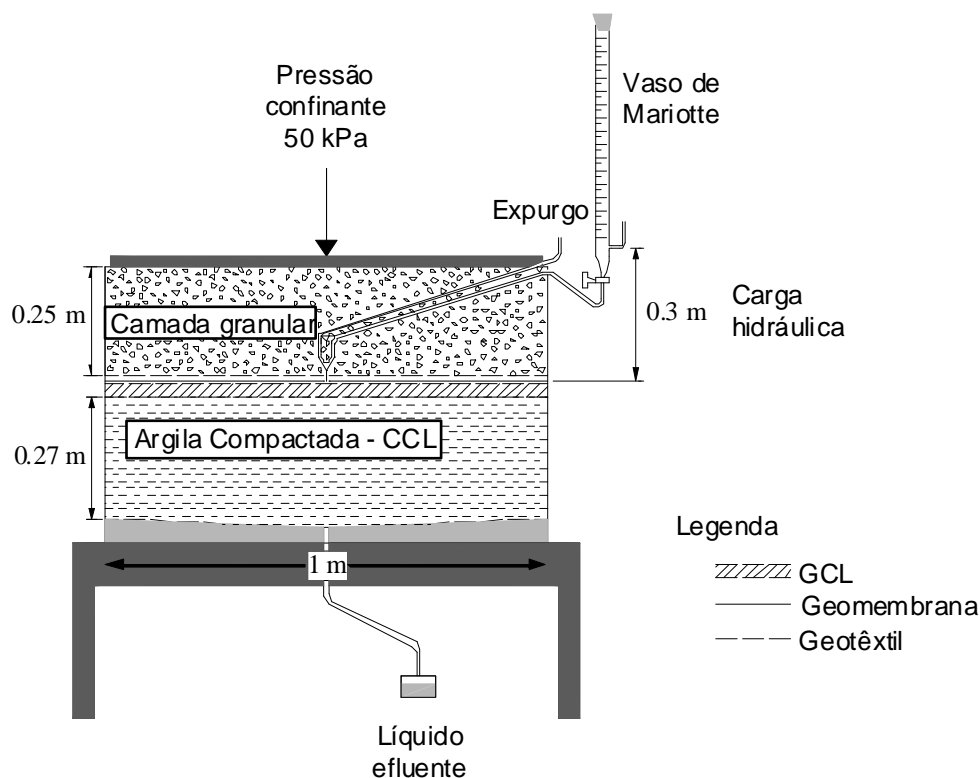


Figura 3.24 - Equipamento em escala intermediária para medida de vazão através de barreira composta devido a um dano na GM (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006).

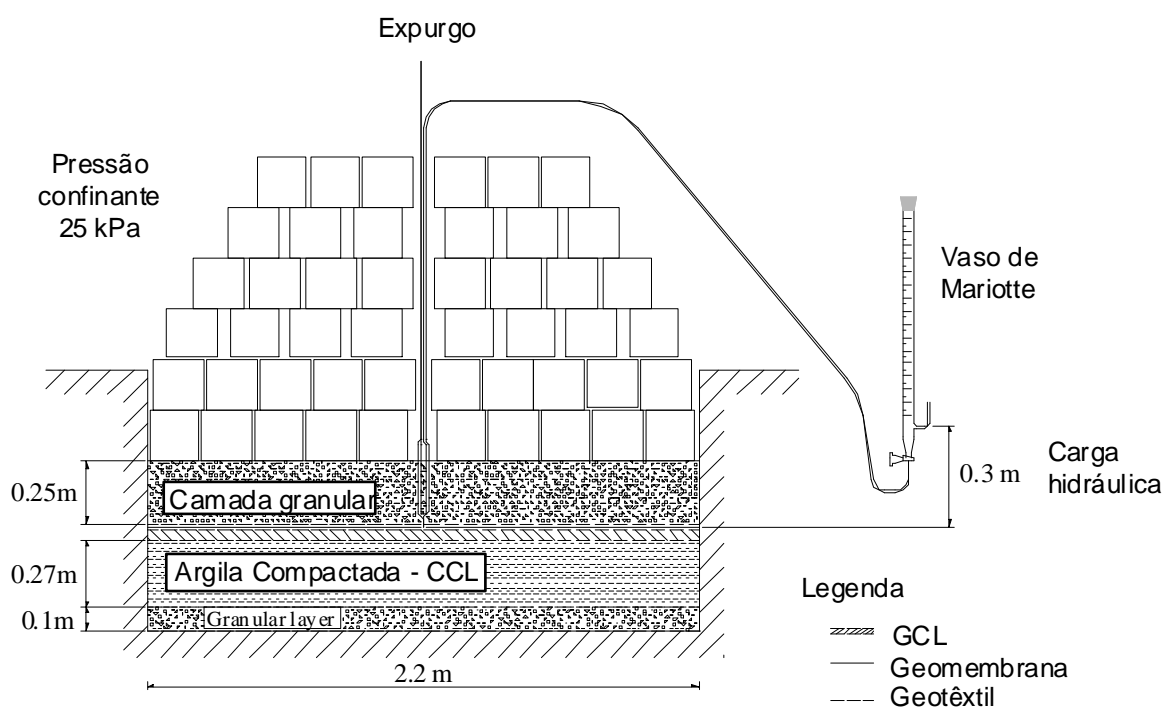


Figura 3.25 – Ensaio em grande escala para medida de vazão através de barreira composta devido a um dano na GM (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006).

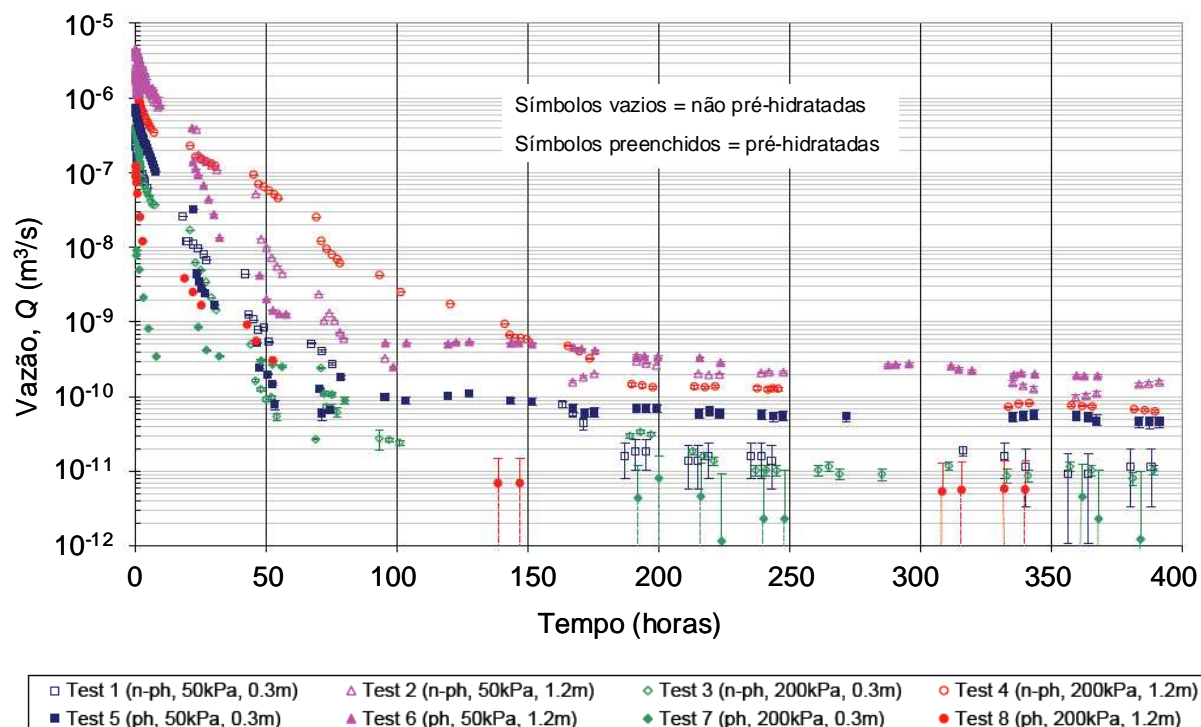


Figura 3.26 – Evolução da vazão em função do tempo para o GCL1, amostras pré-hidratadas e não pré-hidratadas (Barroso, 2005).

Ampliando o estudo de Barroso (2005) e Barroso et al (2006), outros ensaios foram executados por Barroso et al. (2008) usando o equipamento em pequena escala apresentado na Figura 3.23 com o intuito de avaliar a influência do tipo de geomembrana no vazamento ao longo da interface GM-GCL. O solo S2 (descrito anteriormente, com condutividade hidráulica de  $3 \times 10^{-10}$  m/s) compunha a camada de argila compactada. Apenas um tipo de GCL foi usado nos ensaios. Esse era composto por um núcleo de bentonita encapsulado entre dois geotêxteis de polipropileno ligados por agulhagem. Quatro tipos de geomembrana foram usados nos ensaios: (i) lisa; (ii) texturizada por jateamento; (iii) relevo em forma de favos e (iv) texturizada em alto relevo (AR) (Figura 3.27). A geomembrana era submetida a um dano circular de 3 mm de diâmetro. A barreira composta era submetida a uma pressão confinante de 50 kPa e uma carga hidráulica de 0,3 m. Verificou-se que as vazões em regime permanente de fluxo obtidas nos ensaios variaram em um estreito intervalo de  $9,3 \times 10^{-12}$  m³/s a  $1,19 \times 10^{-11}$  m³/s, apesar da diferença da superfície de contato da geomembrana com o GCL subjacente (Figura 3.28). Em termos de transmissibilidade da interface GM-GCL, os valores determinados por meio da solução analítica foram condizentes com a condição de contato GM-GCL da equações empírica proposta por Touze-Foltz & Barroso (2006). Portanto, para as

condições testadas nos ensaios de Barroso et al. (2008), geomembranas lisas ou texturizadas podem ter o mesmo desempenho em termos de transmissibilidade da interface com GCL.

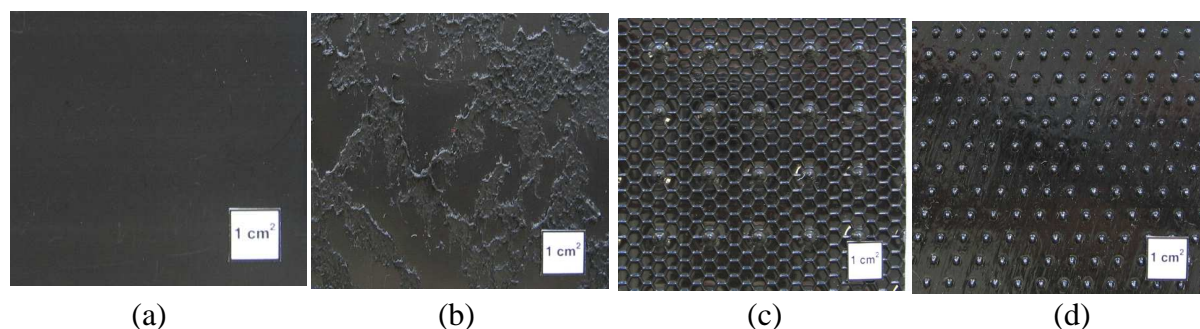


Figura 3.27 – Tipos de geomembranas usadas : (a) GM lisa; (b) GM texturizada por jateamento; (c) GM relevos em forma de favos; (d) GM texturizada AR (Barroso et al., 2008).

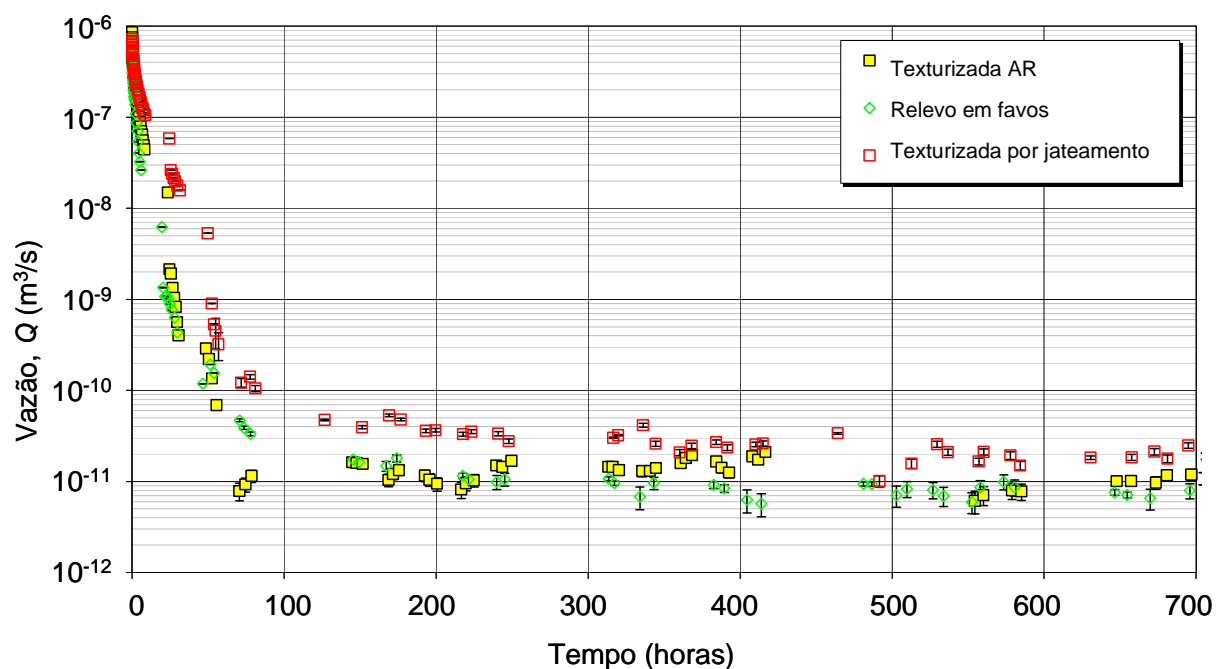


Figura 3.28 - Evolução da vazão em função do tempo para geomembranas com texturas diferentes (Barroso et al., 2008).

Bergamini et al. (2009) e Barroso et al. (2010) estudaram a influência da pressão confinante atuante sobre a barreira composta na transmissibilidade da interface entre a geomembrana danificada e um GCL subjacente. Novamente o equipamento em pequena escala mostrado na Figura 3.23 foi utilizado nos ensaios. Os materiais que compunham a barreira composta dos ensaios eram sempre os mesmos e apenas a pressão confinante variava a cada ensaio. A geomembrana era de HDPE, lisa, com 2 mm de espessura e o GCL e CCL eram os mesmos usados nos ensaios de Barroso et al. (2008), descritos anteriormente. Cada ensaio foi

conduzido com uma carga hidráulica constante de 0,3 m e pressões confinantes diferentes: 25, 50, 75, 100, 150 ou 200 kPa. Verificou-se que a pressão de confinamento tem um impacto reduzido na vazão que passa pelo dano da geomembrana, bem como nos valores de transmissibilidade calculados por meio de retro-análise. Os autores reforçam que apesar de as condições de contato GM-GCL terem sido similares para o intervalo de pressões confinantes estudado, o GCL se comportou de maneira diferente em termos de expansão, dependendo da pressão aplicada. Para pressões entre 25 e 100 kPa foram observadas menores espessuras com o aumento da pressão. Já para pressões maiores que 100 kPa, não houve redução significativa da espessura final do GCL com o aumento da pressão confinante.

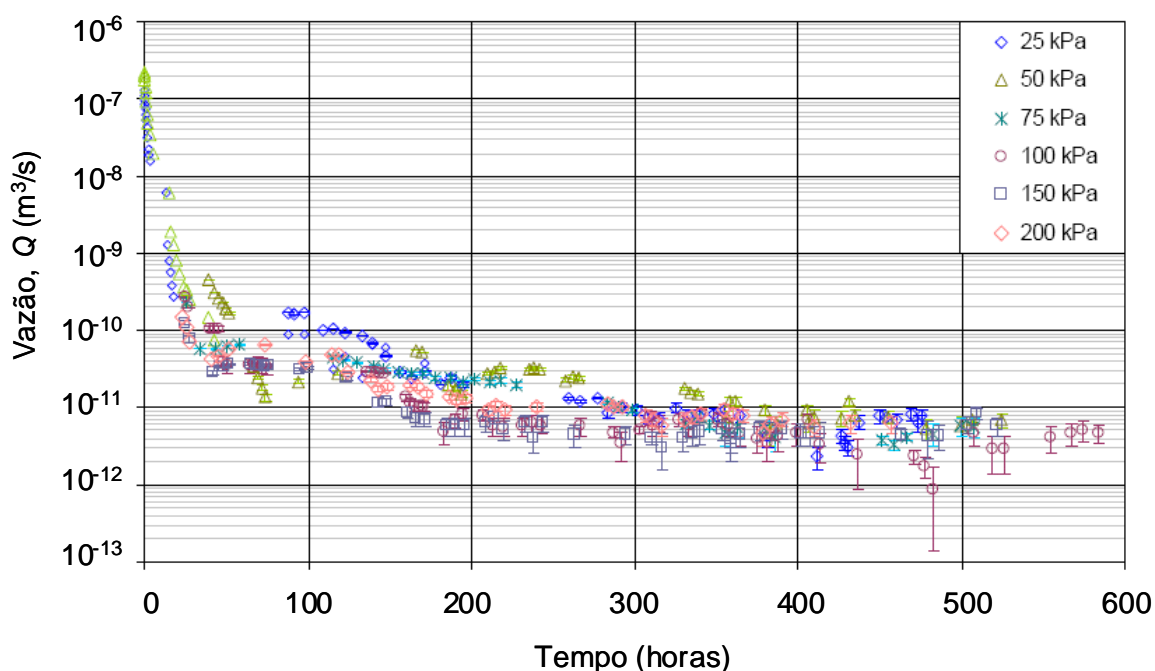


Figura 3.29 – Evolução da vazão em função do tempo para diferentes pressões confinantes (Bergamini et al., 2009; Barroso et al., 2010).

### 3.2.5 COMENTÁRIOS

Muito já se discutiu sobre o vazamento de líquido através de barreira composta devido a danos na geomembrana, como mostrado neste capítulo. Os trabalhos publicados geralmente se concentram na verificação da influência das solicitações das obras, como carga hidráulica e pressão confinante sobre a barreira composta. Alguns estudaram a influência dos materiais utilizados para compor a barreira composta variando o tipo de geomembrana ou o tipo de GCL, a bentonita (granulada ou em pó), os componentes geotêxteis e o tipo de ligação do

GCL. As condições de pré-hidratação (expansão livre ou sob sobrecarga) também foram estudados por alguns autores. Ressalta-se que nenhum estudo foi feito para verificar a influência da natureza da bentonita na vazão através da barreira composta e na transmissibilidade da interface entre a geomembrana e o GCL, sendo que esta é uma característica muito importante para os GCLs no que diz respeito à sua condutividade hidráulica, como confirmam os resultados de Guyonnet et al. (2008; 2009) mostrados no Capítulo 2. Segundo estes autores, os GCLs compostos por bentonita cálcica natural apresentam condutividades hidráulicas maiores que GCLs compostos de bentonitas cálcica ativada ou sódica natural. No presente trabalho, um dos objetivos propostos é investigar a possível influência da natureza da bentonita que compõe o GCL na vazão através do dano na geomembrana e na transmissibilidade na interface GM-GCL. Esse estudo é apresentado na Parte III dessa tese.

### 3 TRANSFERT DE LIQUIDES ET GAZ AU TRAVERS DES BARRIERES GEOSYNTHETIQUES

#### Résumé

L'importance des barrières géosynthétiques dans les ISD ainsi que les problèmes qui peuvent compromettre l'étanchéité des matériaux constitutifs ont été présentés dans le Chapitre 2. Dans la suite, il est important de faire la liaison entre ces problèmes typiquement rencontrés dans les barrières de couverture ou au fond des ISDs, et les possibles conséquences en terme de flux de liquides ou gaz au travers des GCLs ou des étanchéités composites. Les bases théoriques, solutions analytiques et équations empiriques présentées dans le Chapitre 3 permettent la compréhension du mécanisme de transport et sont utilisées dans l'analyse des résultats obtenus au cours de cette étude. Les résultats des études précédentes sont brièvement décrits et servent de données de comparaison avec les résultats obtenus au cours des essais de laboratoire de cette recherche.

Les bases pour la compréhension de la migration de gaz au travers des milieux poreux sont présentées dans l'item 3.1 avec les équations concernant les transferts diffusifs et advectifs. Des études précédentes de laboratoire ont été menées en utilisant plusieurs types de perméamètres basés sur la méthodologie du régime de flux permanent. L'utilisation d'un dispositif basé sur la méthodologie du régime transitoire est très récente. Les résultats indiquent la réduction de la perméabilité aux gaz des GCL avec l'augmentation de la teneur en eau. L'hydratation sous contrainte normale entraîne une réduction de la perméabilité. Une étude explore l'influence de la dessiccation de la bentonite sur la perméabilité au gaz des GCL et donne des valeurs de perméabilité différentes pour les cycles d'hydratation et de séchage. D'autres études explorent l'influence de la déformation du GCL sur sa perméabilité aux gaz. Une partie assez importante est dédiée aux études précédentes concernant l'influence de la fissuration due à la dessiccation de la bentonite et de la capacité d'échange cationique.

Les recherches précédentes dédiées à l'étude de l'écoulement de liquides au travers des étanchéités composites sont présentées dans l'item 3.2. Des solutions analytiques pour des

conditions axisymétriques et bidimensionnelles sont présentées. Des équations empiriques font la relation entre la condition de contact et la transmissibilité de l'interface entre la géomembrane et le matériau sous-jacent. D'autres équations empiriques prévoient le débit de fuite au travers de l'endommagement d'une géomembrane en fonction de la condition de contact et de la configuration de l'étanchéité composite. Quelques études concernent l'influence du géotextile de couverture du GCL en contact avec la geomembrane : on vérifie que le contact direct entre la bentonite du GCL et la GM est très important pour réduire la fuite. Concernant le type de bentonite à l'intérieur du GCL, des études indiquent une meilleure performance des bentonites en poudre au détriment des bentonites granulaires. Différentes textures de la GM de l'étanchéité composite n'ont pas modifié significativement les débits au travers des étanchéités composites. Ainsi, comme vérifié pour la perméabilité aux gaz, l'hydratation du GCL sous contrainte normale est favorable à la réduction de la fuite de liquide au travers de l'étanchéité composite. Concernant d'autres variables telles que la contrainte mécanique pendant l'essai, la pré-hydratation du GCL et la charge hydraulique, il est difficile d'établir des relations simples entre ces variables et l'écoulement de liquide au travers des étanchéités composites.

Tant les études sur le flux de gaz au travers des couvertures des ISD que les études de l'écoulement de liquide au travers du fond des ISDs n'ont pas analysé l'influence de la nature de la bentonite du GCL - sodique ou calcique - sur les performances de la barrière. Cependant, quelques études prouvent que la conductivité hydraulique des GSB à base de bentonite calcique est supérieure à celle des bentonites calciques activées et sodiques naturelles (conductivités hydrauliques très voisines pour ces deux derniers matériaux). C'est pourquoi le travail mené au cours de cette thèse propose d'étudier l'influence de la nature de la bentonite sur les mesures de flux de gaz au travers des GCL, en simulant les conditions de la couverture de ISD ainsi que sur les flux de liquides au travers des étanchéités composites GM-GCL-CCL en simulant les conditions de fond des ISDs.

### 4 MATERIAIS E METODOLOGIA GERAL

Pesquisas da literatura, sumariadas no Capítulo 3, sobre o desempenho de GCLs na cobertura e no fundo de aterros sanitários, mostram a influência de diversos fatores no transporte advectivo de gases e líquidos através de barreiras geossintéticas. Foi estudada a influência das solicitações típicas em obras de aterros sanitários, tais como pressão confinante e carga hidráulica. As pesquisas anteriores estudaram também a influência do tipo de GCL ou geomembrana usados na composição da barreira contra fluxo de gases ou líquidos. Geomembranas lisas e texturizadas foram ensaiadas, e GCLs compostos por diferentes geossintéticos vindos de processos de fabricação distintos também foram investigados.

Os resultados de Gleason et al. (1997) e Guyonnet et al. (2005; 2008; 2009) indicam a importância da natureza da bentonita no seu coeficiente de permeabilidade, tendo sido verificadas diferenças significativas de condutividade hidráulica entre GCLs compostos de bentonita sódica ou cálcica (Tabela 2.5). No entanto, no que diz respeito à permeabilidade ao gás do GCL e ao fluxo de líquido através de barreiras compostas GM-GCL, há uma insuficiência de dados na literatura que abordem a diferença de comportamento de barreiras geossintéticas em função da natureza da bentonita. Por esse motivo, o presente trabalho foca em duas investigações específicas (i) a permeabilidade ao gás de GCLs compostos por bentonita sódica natural, cálcica natural ou cálcica ativada, em solicitações típicas de coberturas de aterros sanitários e (ii) o fluxo de líquido através de barreiras compostas GM-GCL-CCL sob solicitações típicas do fundo de aterros sanitários, variando-se a natureza da bentonita e o modo de fabricação dos GCLs usados na barreira composta.

O estudo da influência da natureza da bentonita no desempenho do GCL como barreira de gases ou líquidos exigiu, primeiramente, a seleção de GCLs de pelo menos dois fabricantes diferentes com produtos compostos por bentonitas sódicas ou cálcicas, naturais e ativadas. A seleção de dois fabricantes permitiria ainda verificar influência do processo de manufatura do GCL. Os GCLs selecionados estão descritos no item 4.1.1. Quanto aos outros componentes da barreira composta, no estudo do fluxo de líquido no fundo de aterros sanitários, a



geomembrana e o solo para compor a camada de argila compactada (CCL) foram os mesmos em todos os ensaios (visto que o estudo da influência desses materiais na eficiência da barreira não era escopo do presente trabalho). A seleção da geomembrana e CCL para compor a barreira composta foi feita de forma a permitir a comparação dos resultados obtidos na presente pesquisa com os da literatura.

## **4.1 MATERIAIS ESTUDADOS**

### **4.1.1 GEOCOMPOSTOS BENTONÍTICOS (GCL)**

Foram selecionados cinco GCLs, vindos de dois fabricantes diferentes (com processos de manufatura diferentes), com bentonitas sódica natural, cálcica natural ou cálcica ativada, para verificar a influência das características dos GCLs na sua eficiência quando instalados na cobertura de aterros sanitários (funcionando como barreira de gases), ou no fundo de aterros sanitários em conjunto com argila compactada e geomembrana (funcionando como barreira de líquidos). A Tabela 4.1 sumaria as principais características dos GCLs que foram testados quanto à sua permeabilidade ao gás e quanto à transmissibilidade da interface com a geomembrana danificada. A nomenclatura adotada para identificação dos GCLs segue o seguinte padrão: X.Y, onde X indica o fabricante e, conseqüentemente, o tipo de fabricação do GCL (1 para GCLs costurados, do primeiro fabricante, e 2 para GCLs agulhados, do segundo fabricante) e Y indica o tipo de bentonita no núcleo dos GCLs (S para bentonita sódica natural, C para bentonita cálcica natural e CA para bentonita cálcica ativada). As principais características das bentonitas que compõem os GCLs testados estão apresentadas na Tabela 4.2.

Os GCLs do primeiro fabricante são compostos por um núcleo de bentonita em pó encapsulado entre dois geotêxteis idênticos na base e cobertura e ligados por meio de costura (espaçadas de 37,5 mm, transversal à direção da fabricação). O geotêxtil, que compõe a base e a cobertura dos GCLs, é do tipo tecido de polipropileno. A natureza da bentonita que compõe o GCL pode ser sódica natural (1.S), cálcica natural (1.C) ou cálcica ativada (1.CA). A bentonita é contida no núcleo por um véu de geotêxtil não tecido de baixa gramatura (60 g/m<sup>2</sup>). A Figura 4.1a ilustra os GCLs do primeiro fabricante com sua seção transversal esquemática.

Tabela 4.1 – Principais características dos GCLs testados (Guyonnet et al., 2008).

	Material	1.S	1.C	1.CA	2.S	2.C
GCL	Espessura sob 10 kPa EN ISO 9863-1 (mm)	7,0	11,7	6,5	7,7	8,4
	Gramatura EN 14196 (kg/m <sup>2</sup> )	5,41	10,59	5,46	7,40	5,73
	Condutividade Hidráulica NF P 84-705 sob 50 kPa. (m/s)	$3,2 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$1,6 \times 10^{-11}$	$5,8 \times 10^{-8}$
	Processo de manufatura	Costuras a cada 37,5 mm	Costuras a cada 37,5 mm	Costuras a cada 37,5 mm	Agulhagem	Agulhagem
Geotêxtil da cobertura	Código do geotêxtil	GTX1	GTX1	GTX1	GTX2	GTX2
	Material	PP, W	PP, W	PP, W	PP, W	PP, W
	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	110	110	110	100	100
Bentonita	Bentonita	Na Natural em pó	Ca Natural em pó	Ca Ativada em pó	Na Natural granular	Ca Natural granular
	Massa por superfície (umidade natural) (kg/m <sup>2</sup> )	5,13	10,31	5,18	7,00	5,43
	Massa seca por superfície (kg/m <sup>2</sup> )	4,5	9,4	4,7	6,1	4,9
	Umidade natural (%)	14,8	9,5	10,5	14,3	11,5
Geotêxtil da base	Código do geotêxtil	GTX1	GTX1	GTX1	GTX3	GTX3
	Material	PP, W	PP, W	PP, W	PP, NW	PP, NW
	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	110	110	110	200	200

Notas: PP: polipropileno; W: geotêxtil tecido; NW: geotêxtil não tecido.

Os GCLs do segundo fabricante são compostos por um geotêxtil não tecido de polipropileno na base do GCL, um núcleo de bentonita granular sódica natural (2.S) ou cálcica natural (2.C) e um geotêxtil tecido de polipropileno na cobertura do GCL. As camadas de geotêxtil e bentonita são ligadas por agulhagem. A Figura 4.1b ilustra os GCLs do segundo fabricante e sua respectiva seção transversal esquemática.

Tabela 4.2 - Composição mineralógica das bentonitas (Guyonnet et al., 2008).

GCLs	Smectita (%)	Calcita (%)	Feldspatos (%)	Crisobalita (%)	Quartzo (%)	Índice de expansão* (cm <sup>3</sup> /2g)
1.S	76,5	1,8	1,2	0,0	4,4	34,0
1.C	76,8	0,9	2,3	1,9	7,3	10,0
1.CA	75,0	7,0	7,6	1,0	1,3	34,0
2.S	68,8	0,0	10,5	4,5	8,3	33,5
2.C	29,6	0,4	0,0	8,7	9,0	<10,0

Nota: \*Ensaio executado de acordo com a norma XP P 84-703, com a bentonita em contato com água destilada (desmineralizada).

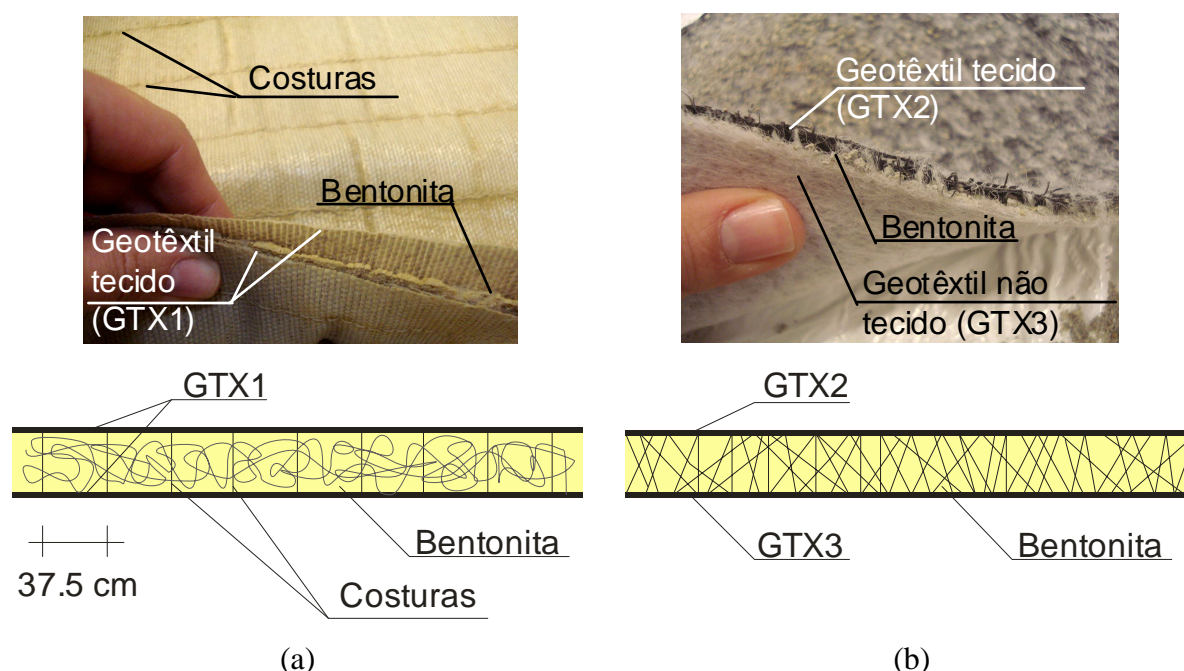


Figura 4.1 – Geocompostos bentoníticos testados: (a) fabricante 1 (GCLs 1.S, 1.C e 1.CA); (b) fabricante 2 (GCLs 2.S e 2.C).

Nos ensaios de permeabilidade ao gás, os três GCLs do primeiro fabricante foram testados e nos ensaios de fluxo de água através de uma barreira composta GM-GCL-CCL, todos os GCLs foram testados, com exceção do GCL 1.CA, como sumariado na Tabela 4.3 .

Tabela 4.3 – Ensaios executados em cada tipo de GCL.

Tipo de ensaio	1.S	1.C	1.CA	2.S	2.C
Permeabilidade ao gás de GCLs (Estudo apresentado na Parte II)	✓	✓	✓		
Fluxo de água através de barreira composta (Estudo apresentado na Parte III)	✓	✓		✓	✓

#### 4.1.2 GEOMEMBRANA (GM)

Uma geomembrana de 2 mm de espessura, lisa, de polietileno de alta densidade (HDPE), idêntica àquela utilizada por Barroso et al. (2006), foi selecionada para os ensaios de fluxo de água através de barreira composta, executados na presente pesquisa. Cada amostra era submetida a um dano mecânico circular de 4 ou 10 mm de diâmetro, (o que corresponde a áreas de 12,6 ou 78,5 mm<sup>2</sup>) localizado no seu centro, para simular os efeitos dos danos mecânicos causados pela camada granular sobrejacente no vazamento através da barreira composta, como discutido no Capítulo 2. Esta geomembrana foi escolhida por ser representativa dos materiais geralmente empregados no fundo de aterros sanitários. Além disso, a escolha dessa geomembrana aproxima as condições dos ensaios da presente pesquisa aos ensaios conduzidos por Barroso et al. (2006; 2008; 2010) facilitando a comparação dos resultados.

#### 4.1.3 BARREIRA MINERAL (CCL)

O solo usado para compor a barreira mineral (camada de argila compactada, CCL), sobre a qual o GCL era instalado nos ensaios de fluxo de água através de barreiras compostas, foi o mesmo utilizado em um aterro sanitário a oeste de Portugal, oriundo de depósitos continentais sedimentares de formações Jurássicas e Cretáceas, com diferentes níveis de argila, calcário, areias silto-argilosas e arenitos (Barroso, 2005). Este solo apresenta 74 % de finos e 41% de

argila. A Tabela 4.4 sumaria as principais características do solo usado, chamado de S1 na presente pesquisa.

Tabela 4.4 - Características do solo da barreira mineral dos ensaios de fluxo de água através de barreiras compostas (Barroso, 2005).

Solo	Percentual de fino (%)	Percentual de argila (%)	Limites de Atterberg ASTM D 4318			Proctor modificado ASTM D 1557		$k_{CCL}$ (m/s)
			$w_L$	$w_P$	$IP$	$w_{opt}$	$\gamma_{d\ max}$	
			(%)	(%)	(%)	(%)	(kN/m <sup>3</sup> )	
S1	74	41	54	24	30	13,6	19,1	$8 \times 10^{-11}$

Notas:  $k_{CCL}$  = condutividade hidráulica do solo compondo a CCL;  $IP$  = índice de plasticidade;  $w_L$  = limite de liquidez;  $w_{opt}$  = umidade ótima;  $w_P$  = limite de plasticidade;  $\gamma_{d\ max}$  = densidade seca máxima.

## 4.2 METODOLOGIA GERAL

A pesquisa abrange o estudo da influência do tipo de GCL na barreira de cobertura ou de fundo dos aterros sanitários por meio de ensaios de laboratório que simulem as condições de solicitação em campo. As metodologias específicas de cada ensaio estão descritas detalhadamente nos capítulos correspondentes ao estudo do transporte de gases através de GCLs (Parte II, Capítulo 5), simulando a barreira na cobertura dos aterros sanitários, e ao estudo do transporte de líquidos através de barreiras compostas (Parte III, Capítulo 7), simulando as solicitações do fundo dos aterros sanitários. Ambos os estudos buscaram, sobretudo a aproximação das condições testadas em laboratório às condições reais do campo. Uma abordagem geral sobre a metodologia dos ensaios é descrita a seguir.

Os ensaios de permeabilidade ao gás de GCLs foram conduzidos em um equipamento denominado permeâmetro de fluxo transiente. Esse equipamento se baseia no método do fluxo transiente, em que são feitas medidas da queda de pressão de gás dentro de uma câmara coberta pelo corpo de prova. Uma solução analítica permite relacionar o tempo de queda da pressão com o coeficiente de permeabilidade do material poroso submetido ao ensaio. Esse método apresenta uma vantagem indispensável em relação ao método do fluxo permanente: ele permite que o diferencial de pressão de gás entre as duas faces do GCL seja próximo dos valores encontrados no campo, o que aproxima o ensaio de laboratório às condições que

seriam encontradas numa aplicação real. O equipamento, o método de preparação das amostras e a solução analítica para o estudo da permeabilidade ao gás dos GCLs estão apresentados no Capítulo 5.

Para simular o fundo dos aterros sanitários, os ensaios de fluxo através de barreiras compostas GM-GCL-CCL foram conduzidos em um equipamento que permite medir a vazão através de uma barreira composta devido a um furo na geomembrana. Soluções analíticas e equações empíricas permitem o cálculo da transmissibilidade da interface GM-GCL usando os valores de vazão em regime permanente de fluxo. O equipamento usado permite simular, em laboratório, as condições típicas do fundo de aterros sanitários no que diz respeito a cargas hidráulicas e pressões confinantes. O equipamento e o método de preparação das amostras e o método do ensaio de laboratório para o estudo do fluxo através da barreira composta estão apresentados no Capítulo 7.

### 4 MATERIAUX ET METHODOLOGIE GENERALE

#### Résumé

L'influence de la nature de la bentonite sur la conductivité hydraulique des géosynthétiques bentonitiques (GSB) a été étudiée par le passé (Gleason et al., 1997 et Guyonnet et al., 2005; 2008; 2009). Bien que ces études aient démontré que la conductivité hydraulique des GSB contenant de la bentonite calcique est supérieure à la conductivité hydraulique des GSB contenant des bentonites sodiques naturelles ou calciques activées pour ce qui concerne la conductivité hydraulique à l'eau, la littérature ne fournit pas de résultats relatifs à l'influence de la nature de la bentonite sur la perméabilité au gaz des GSB. Qui plus est, l'influence de la nature de la bentonite sur les transferts dans les étanchéités composites n'a pas non plus été étudiée..

Dans ce contexte, les matériaux sélectionnés pour l'étude de l'écoulement de gaz et de liquides au travers des barrières geosynthetiques en simulant les conditions de couverture et de fond des ISD incluent des GSB provenant de différents producteurs et contenant des bentonites calciques ou sodiques (paragraphe 4.1). Cinq GSB issus de deux producteurs ont été sélectionnés. Ceux du premier producteur sont cousus et contiennent de la bentonite en poudre, soit sodique naturelle (1.S), calcique naturelle (1.C) ou calcique activée (1.CA). Ceux du deuxième producteur sont aiguilletés et contiennent de la bentonite sous forme de granulés sodique naturelle (2.S) ou calcique naturelle (2.C). Pour réaliser l'étanchéité composite dans l'étude de l'écoulement de liquide, une geomembrane de PEHD de 2 mm d'épaisseur a été sélectionnée. Les géomembranes de PEHAD sont les plus utilisées en fond d'ISD. Qui plus est, une géomembrane similaire a été utilisée dans des études précédentes (Barroso et al., 2006; 2008; 2010). Enfin, le sol qui compose la couche argileuse dans le cadre des essais réalisés dans cette étude est également un matériau de référence puisqu'il a servi dans des études précédentes (Barroso et al., 2006; 2008; 2010). Les résultats obtenus peuvent ainsi être comparés à ceux de la littérature portant sur l'influence d'autres facteurs que la nature de la bentonite dans le GSB.

Le paragraphe 4.2 décrit très brièvement la méthodologie général de la recherche. La description détaillée de chaque essai, de l'équipement, de la préparation des échantillons, etc..., sera effectuée séparément pour l'étude de transfert de gaz au travers des GSB (Partie I, Chapitre 5) et pour l'étude de transfert de liquide au travers des étanchéités composites (Partie II, Chapitre 7) dans la suite de ce mémoire.



## **PARTE II**

### *Estudo do transporte de gases através de GCLs*

#### **Capítulo 5..... 90**

*Metodologia do estudo do transporte de gases através de GCLs*

#### **Capítulo 6..... 112**

*Resultados do estudo do transporte de gases através de GCLs*

### 5 METODOLOGIA DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE GASES ATRAVÉS DE GCLs

#### 5.1 INTRODUÇÃO

O estudo do transporte de gases através de GCLs que compõem a cobertura de aterros sanitários deve ser feito em função do seu teor de umidade, do qual depende o seu coeficiente de permeabilidade. No entanto, a caracterização da permeabilidade ao gás sob diferentes níveis de hidratação do GCL pode ser dificultada devido a possíveis variações dos mecanismos de transporte para teores de umidade diferentes. O gradiente de pressões totais é o principal mecanismo que governa o transporte advectivo através de um material poroso. O transporte advectivo ocorre quando os poros do material são grandes o suficiente para garantir que o fluxo segue a lei de Darcy, permitindo a determinação de um coeficiente de permeabilidade que não depende da natureza do gás (Bouazza & Vangpaisal, 2003). No caso de transporte por difusão, o gradiente de concentração do gás é que governa o mecanismo de transporte nas condições de altos graus de saturação do material poroso. Neste caso o coeficiente de difusão obtido da lei de Fick é o parâmetro relevante no transporte e depende da natureza do gás (Aubertin et al., 2000).

O uso do coeficiente de permeabilidade simplesmente para a caracterização do fluxo de gás através de GCLs pode não ser consistente devido à possibilidade de ocorrerem diferentes mecanismos de transporte (difusão e/ou advecção) especialmente em corpos de prova com altos graus de saturação. No entanto, independentemente do tipo de transporte que prevaleça, a permeabilidade pode ser caracterizada por meio do fluxo de gás através o material testado. Barral et al. (2009) mostraram que o método da queda de pressão, utilizado na presente pesquisa para o estudo da permeabilidade ao gás de GCLs, também se aplica a situações onde o fluxo de gás não obedece à lei de Darcy, desde que a caracterização da permeabilidade do material seja expressa em termos de constante de tempo  $\tau$  como mostram as bases teóricas do método apresentadas no item 5.2 a seguir. A metodologia dos ensaios é apresentada em seguida, no item 5.3.

## 5.2 BASES TEORICAS

O princípio geral dos ensaios de permeabilidade utilizando o método da queda de pressão consiste em medir o tempo necessário para que uma pressão inicial de gás  $P_c(0)$ , dentro de uma câmara de volume  $V$ , seja dissipada devido ao transporte do gás através de um corpo de prova de um material poroso de espessura  $Z$ , equalizando as pressões interna e externa, ou seja, até que o diferencial das pressões interna e externa,  $\Delta P_c(t)$ , seja nulo. A Figura 5.1 mostra esquematicamente o equipamento proposto por Li et al. (2004) para medir a permeabilidade ao gás de asfalto usando o método da queda de pressão. A variação da pressão dentro da câmara com o tempo  $P_c(t)$  depende da permeabilidade  $k$  do material poroso. Por meio de modelo matemático descrito por Li et al. (2004) e apresentado a seguir, é possível relacionar a taxa de redução da pressão dentro da câmara com a permeabilidade do material poroso.

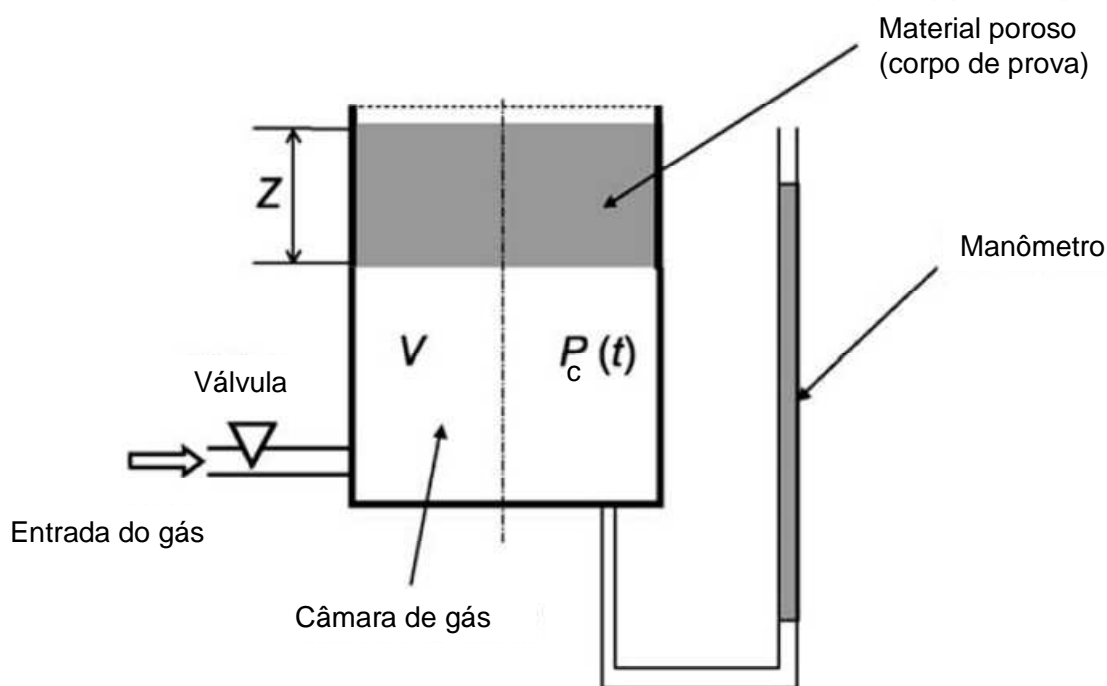


Figura 5.1 – Esquema do permeômetro de queda de pressão (modificado de Li et al., 2004).

O fluxo advectivo isotérmico, unidimensional, vertical e compressível de um gás através de um material poroso, governado pelo gradiente de pressões aplicado, é regido por uma equação diferencial obtida a partir da lei de Darcy combinada com a equação de continuidade e equação dos gases perfeitos (Baehr & Hult, 1991; Li et al., 2004).

$$\frac{P_m}{P(z,t)} \frac{n_g}{P_m} \frac{\partial P^2(z,t)}{\partial t} = \frac{k}{\eta} \frac{\partial^2 P^2(z,t)}{\partial z^2} \quad (5.1)$$

onde  $n_g$  é a porosidade do corpo de prova,  $P_m$  é a pressão média de gás, definida como a média entre as pressões máxima e mínima do ensaio,  $P(z,t)$  é a pressão da fase gasosa na amostra,  $k$  é a permeabilidade ao gás do material poroso,  $\eta$  é a viscosidade dinâmica do gás,  $t$  é o tempo e  $z$  é a distância a ser percorrida pelo fluxo de gás ao longo da amostra ( $z = 0$  na face da amostra em contato com a câmara de gás e  $z = Z$  na face em contato com a atmosfera, veja a Figura 5.1).

Considerando que a pressão atmosférica seja de aproximadamente 100 kPa (o que corresponde ao nível do mar) e a pressão máxima aplicada dentro da câmara seja de 106 kPa, por exemplo (considerando que é improvável que o diferencial de pressão seja maior que 10 kPa, como verificado por McBean et al., 1995), a pressão média  $P_m$  seria de 103 kPa. O termo  $P_m/P(z,t)$  da Equação 5.1 pode ser considerado igual a 1, com um erro menor do que 3%. A Equação 5.1 torna-se então:

$$\frac{n_g}{P_m} \frac{\partial P^2(z,t)}{\partial t} = \frac{k}{\eta} \frac{\partial^2 P^2(z,t)}{\partial z^2}, \quad 0 < z < Z \quad (5.2)$$

As condições de contorno das faces inferior e superior da amostra do material poroso satisfazem as Equações 5.3 e 5.4, respectivamente:

$$P^2(z,t) \Big|_{z=0} = P_c^2(t) \quad (5.3)$$

$$P^2(z,t) \Big|_{z=Z} = P_{atm}^2 \quad (5.4)$$

onde  $P_c$  é a pressão dentro da câmara e  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica.

Integrando a Equação 5.2 no intervalo  $(0, \xi)$ , em função de  $z$ , e em seguida integrando-se no intervalo  $(0, Z)$  em função de  $\xi$  (onde  $\xi$  é o fator de integração) e usando as condições de contorno apresentadas nas Equações 5.3 e 5.4, tem-se:

$$\left. \frac{\partial P^2(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{P_{atm}^2 - P_c^2(t)}{Z} (1 - \varepsilon) \quad (5.5)$$

sendo  $\varepsilon$  é definido pela Equação 5.6:

$$\varepsilon = \frac{1}{P_{atm}^2 - P_c^2(t)} \frac{n_g \eta}{k P_m} \int_0^Z \left[ \int_0^\xi \frac{\partial P^2}{\partial t}(z,t) dz \right] d\xi \quad (5.6)$$

Diferenciando ambos os lados da Equação 5.2 em relação a  $t$ , usando as condições de contorno das Equações 5.3 e 5.4 e considerando que a maior queda de pressão na amostra  $P(z,t)$  se dá em  $z = 0$ ;  $P(z,t)$  satisfaz então a Equação 5.6 para todo tempo  $t$  e todo  $z$ , tal que  $0 \leq z \leq Z$ :

$$\left| \frac{\partial P^2(z,t)}{\partial t} \right| \leq \left| \frac{dP_c^2(t)}{dt} \right| = 2 \left| P_c(t) \frac{dP_c(t)}{dt} \right|, \quad (0 < z < Z) \quad (5.7)$$

Que substituído na Equação 5.6, torna-se:

$$|\varepsilon| \leq \frac{n_g \eta Z^2}{k P_m} \frac{P_c(t)}{P_c^2(t) - P_{atm}^2} \left| \frac{dP_c(t)}{dt} \right|^{def} = \delta \quad (5.8)$$

Se  $\delta \ll 1$ , então o termo  $\varepsilon$  pode ser desconsiderado na Equação 5.5:

$$\left. \frac{\partial P^2(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} \approx \frac{P_{atm}^2 - P_c^2(t)}{Z} \quad (5.9)$$

A Equação 5.9 considera a função  $P^2(z,t)$  como uma função linear em  $z$ , o que parece coerente, visto que a espessura  $Z$  do corpo de prova é pequena em relação às dimensões da câmara.

O balanço da massa de gás permeado através da interface entre a câmara e a superfície do corpo de prova permite obter uma equação de duas derivadas parciais que relacionam a evolução temporal e espacial da pressão em  $z = 0$ . A massa de gás que flui através do corpo de prova de superfície  $A$  no intervalo de tempo  $t, t + dt$  é dada por:

$$dm_g = A \rho(0,t) v(0,t) dt \quad (5.10)$$

onde  $m_g$  é a massa de gás permeando através do material poroso,  $A$  é a área da seção transversal do material poroso,  $\rho$  é a massa específica do gás e  $v$  é a velocidade do fluxo.

A massa de gás perdida dentro da câmara de volume  $V$  no tempo  $dt$  é expressa por:

$$dm_p = -V \frac{d\rho(0,t)}{dt} dt = -V d\rho(0,t) \quad (5.11)$$

De acordo com a lei da conservação de massa, na superfície  $z = 0$ ,  $dm_g$  é igual à  $dm_p$  e, portanto:

$$A\rho(0,t)v(0,t)dt = -Vd\rho(0,t) \quad (5.12)$$

Considerando que o gradiente de pressão seja o principal mecanismo que governa o transporte advectivo através de um material poroso e considerando que a componente gravitacional seja insignificante, o fluxo gasoso unidimensional e isotérmico através de um meio poroso de espessura  $Z$  pode ser idealmente descrito pela lei de Darcy estendida aos gases (Stonestrom & Rubin, 1989):

$$v(z,t) = -\frac{k}{\eta} \cdot \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} \quad (5.13)$$

De acordo com a lei dos gases ideais (Baehr & Hult, 1991):

$$\rho(z,t) = \frac{\omega \cdot P(z,t)}{RT} \quad (5.14)$$

onde  $\rho(z,t)$  é a densidade de fase gasosa,  $\omega$  é o peso molecular médio do gás,  $T$  é a temperatura absoluta do gás e  $R$  é a constante universal dos gases.

Assumindo que a temperatura absoluta  $T$  da Equação 5.14 seja constante (fluxo isotérmico) e substituindo as Equações 5.13 e 5.14 em 5.12, tem-se:

$$\left. \frac{Ak}{2V\eta} \frac{\partial P^2(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{dP_c(t)}{dt} \quad (5.15)$$

onde  $P_c(t)$  é igual a  $P(0,t)$  dentro da câmara de gás no tempo  $t$ .

Combinando as Equações 5.9 e 5.15, chega-se a uma equação simplificada que descreve a evolução temporal da pressão dentro da câmara  $P_c(t)$ , em função das dimensões da câmara e das características do material poroso e do gás:

$$\frac{dP_c(t)}{dt} = \frac{Ak}{2V\eta} \frac{1}{Z} [P_{atm}^2 - P_c^2(t)] \quad (5.16)$$

Integrando a Equação 5.16 de 0 a  $t$  tem-se:

$$\ln \left( c \frac{P_c(t) - P_{atm}}{P_c(t) + P_{atm}} \right) = - \frac{AP_{atm}k}{VZ\eta} t \quad (5.17)$$

onde:

$$c = \frac{P_c(0) + P_{atm}}{P_c(0) - P_{atm}} \quad (5.18)$$

Graças à Equação 5.17, Li et al. (2004) puderam calcular o valor da permeabilidade ao gás de materiais porosos, nesse caso um asfalto, em função da queda de pressão dentro da câmara com o tempo,  $P_c(t)$ , sem a necessidade de medida de vazão e com a aplicação de pressões relativamente baixas dentro da câmara.

Nos estudos sobre a permeabilidade ao gás de argilas compactadas, Barral (2008) considerou que, sendo  $P_c(t)$  muito próximo de  $P_{atm}$ , uma aproximação suplementar podia ser considerada para simplificar mais a equação proposta por Li et al. (2004):

$$P_{atm}^2 - P_c^2(t) \approx 2P_{atm}(P_{atm} - P_c(t)) \quad (5.19)$$

Substituindo a Equação 5.19 em 5.16, tem-se:

$$\frac{dP_c(t)}{dt} = \frac{Ak}{V\eta} \frac{1}{Z} [P_{atm}(P_{atm} - P_c(t))] \quad (5.20)$$

cuja solução analítica é dada pela Equação 5.21, a seguir:

$$\ln \frac{P_c(t) - P_{atm}}{P_c(0) - P_{atm}} = - \frac{t}{\tau} \quad (5.21)$$

em que  $\tau$  representa a constante de tempo dada por:

$$\tau = \frac{V\eta Z}{AkP_{atm}} \quad (5.22)$$

Segundo Barral (2008), os resultados obtidos da simplificação proposta foram idênticos àqueles determinados usando a solução proposta por Li et al. (2004). Graças ao método da queda de pressão, o coeficiente de permeabilidade intrínseco de um material poroso pode ser determinado a partir de um ensaio simples, sem a necessidade de medida da vazão que atravessa o corpo de prova. Como comentado no início do capítulo, Barral et al. (2009) ressaltam que nas situações onde o fluxo de gás não obedece à lei de Darcy, o método ainda pode ser aplicado, contando que a caracterização da permeabilidade ao gás do material seja expressa em termos de constante de tempo,  $\tau$ .

### 5.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE AO GÁS DE GCLs

#### 5.3.1 EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO GÁS DE GCLs

O equipamento utilizado para os ensaios de permeabilidade ao gás de GCLs, denominado “permeômetro de fluxo transiente” foi desenvolvido no Laboratoire d’Étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) da Université de Grenoble por Pitanga (2007). Este equipamento foi desenvolvido para medir a permeabilidade ao gás de GCLs usando o método da queda de pressão e foi previamente usado em outras pesquisas, como Pitanga (2007) e Pitanga et al. (2009), para a determinação da permeabilidade ao gás de GCLs. Foi também utilizado por Barral (2008) para a determinação da permeabilidade ao gás de uma argila compactada. Este equipamento é composto basicamente da célula do permeômetro de fluxo transiente propriamente dita (Figura 5.2), um sistema de aplicação de pressão de gás ligado à célula, composto por um cilindro de nitrogênio e válvulas controladoras de pressão, e um sistema de aquisição automática de dados (Figura 5.3), ligado ao transdutor que media a pressão de gás na entrada da célula.

O esquema da célula do permeômetro de fluxo transiente, com todos os seus componentes detalhados, é apresentado na Figura 5.4. A célula é composta de três unidades cilíndricas de alumínio: (i) inferior, (ii) intermediária e (iii) superior. Uma camada granular, cujo volume de vazios,  $V$ , é conhecido (igual a  $3,43 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ), é posicionada dentro da unidade inferior. No contorno da unidade inferior, em um rebaixo anelar próprio para isso, é posicionada uma



membrana (ver o detalhe da Figura 5.4) para garantir a estanqueidade entre as unidades inferior e intermediária. A unidade intermediária é cilíndrica com uma borda anelar inferior para receber as extremidades do corpo de prova a ser ensaiado. Uma pasta de bentonita é distribuída ao longo da borda com o intuito de vedar o contato entre a unidade intermediária e as extremidades do corpo de prova (detalhe da Figura 5.4 e Figura 5.5). A superfície útil do corpo de prova do GCL, um disco de 400 mm de diâmetro, fica em contato direto com a camada granular e uma borda anelar de 27 mm é apoiada na unidade intermediária. A unidade superior é assentada fixando as bordas do corpo de prova e deixando livre a sua superfície útil. O contato entre o corpo de prova e a unidade superior é também vedado pela pasta de bentonita. Na parede interna da unidade intermediária é acoplado um anel de vedação (Figuras 5.4 e 5.5) para garantir a vedação entre as unidades intermediária e superior. Todo o sistema é fixado em torno da célula por meio de 5 barras rosqueadas. Não é recomendado que os parafusos sejam muito atarrachados, para evitar a extrusão da bentonita nas bordas do corpo de prova do GCL, o que pode, inclusive, prejudicar a vedação do sistema. A preparação do ensaio era feita sempre com atenção aos pontos críticos de vazamento de gás para garantir a estanqueidade da célula e a medida acurada das pressões na câmara da unidade inferior.



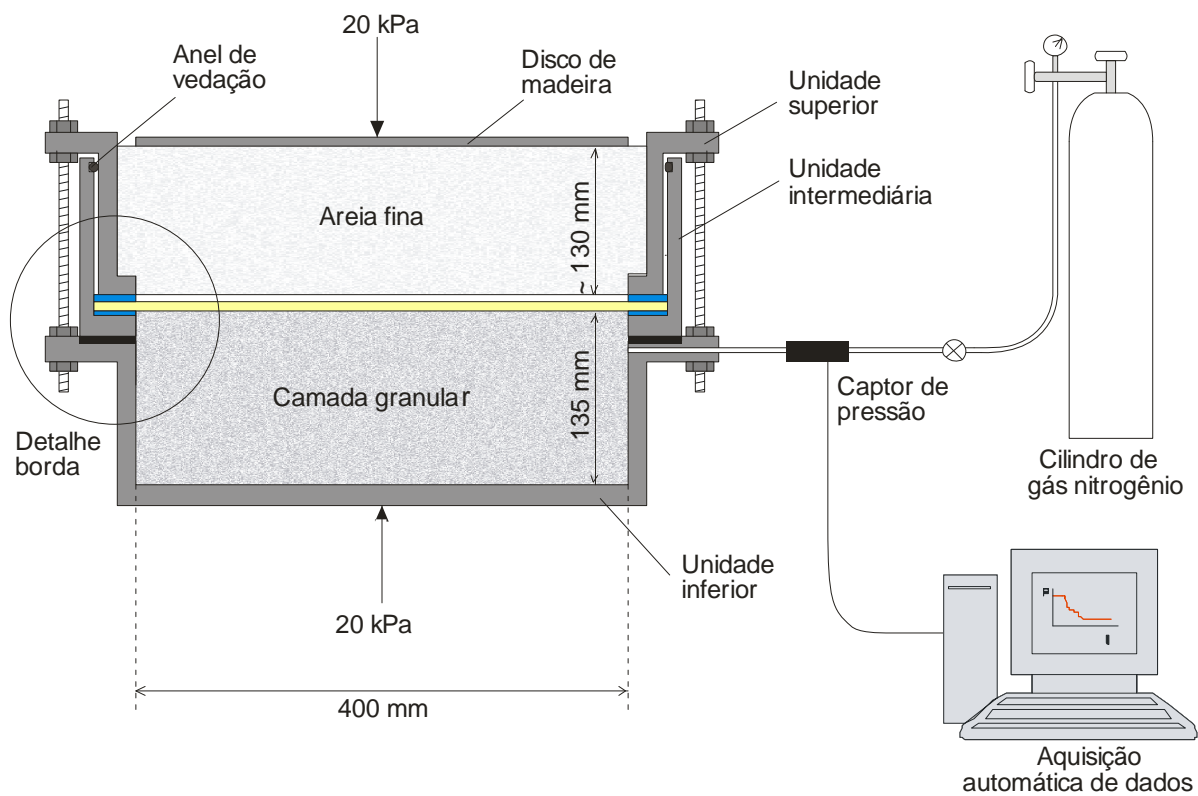
Figura 5.2 – Célula do permeâmetro de fluxo transiente.



Figura 5.3 – Detalhe do sistema de aquisição automática de dados.

Os GCLs eram testados sob uma tensão confinante de 20 kPa (ISO CD 10773) que simula a compressão devido à uma cobertura de solo de proteção de aproximadamente 1 metro de espessura sobre o GCL do aterro sanitário (espessura mínima para prevenir a dessecação do GCL como indicado por Zanzinger, 2008). A pressão confinante sobre o GCL era aplicada por meio de uma prensa mecânica. Uma camada de 150 mm de espessura de areia fina sobre o GCL permitia a distribuição uniforme da pressão vertical no corpo de prova. Um geotêxtil não tecido com gramatura de 300 g/m<sup>2</sup> era instalado entre o GCL e a camada de areia com o intuito de evitar a contaminação do GCL por esta areia (detalhe da Figura 5.4).

Um cilindro de gás nitrogênio (N<sub>2</sub>, viscosidade,  $\eta$ , de  $1,76 \times 10^{-5}$  Pa·s, densidade  $\rho$  de 1,15 kg/m<sup>3</sup> a 20°C) era conectado à câmara da unidade inferior da célula por meio de uma porta de entrada que permitia que o gás chegasse à câmara preenchendo os vazios da camada granular sobre a qual estava instalado o corpo de prova de GCL (Figura 5.4). O nitrogênio foi o gás selecionado para o estudo por se tratar de um gás relativamente inerte, com solubilidade em água muito baixa e que representa bem o transporte de outros gases nas condições ensaiadas. Além disso, como os ensaios eram conduzidos em laboratório e sem a coleta do gás efluente, era indispensável o uso de um gás não tóxico. Uma célula de pressão instalada na mangueira de entrada do gás na célula era ligada a um sistema de aquisição automática de dados, que fornecia as medidas de pressão medidas dentro da câmara em função do tempo.



Detalhe da estanqueidade na borda do corpo de prova

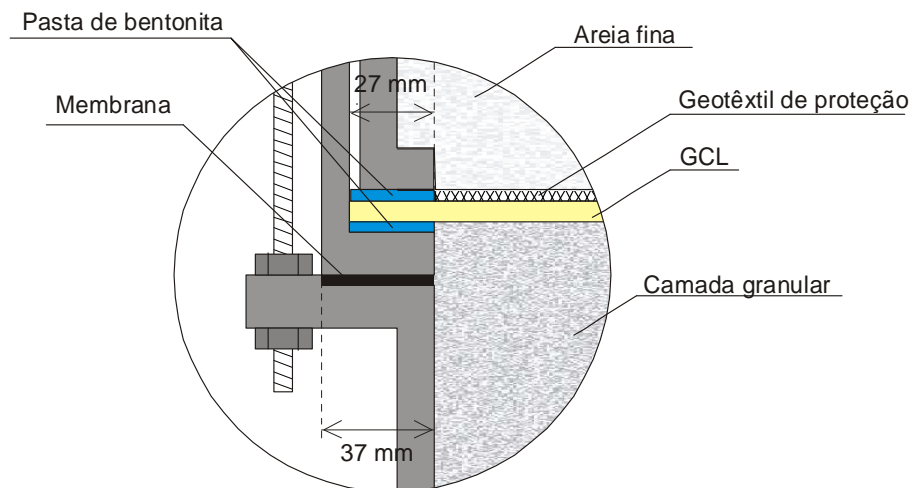


Figura 5.4— Permeâmetro de fluxo transiente.



Figura 5.5 – Detalhe do interior da unidade intermediária.

Para a execução do ensaio, os vazios da camada granular subjacente ao GCL (câmara) devem estar a uma pressão inicial constante  $P_c(0)$  (aplicada por meio da injeção de gás controlada por meio de uma válvula de ajuste fino) e, uma vez a câmara isolada da alimentação de gás (fechando o registro de alimentação rapidamente), a redução da pressão com o tempo  $P_c(t)$  é registrada pelo sistema de aquisição automática de dados até que o diferencial de pressões  $\Delta P_c(t)$  (pressão de gás nos poros da camada granular, menos a pressão atmosférica) seja igual a zero. A pressão atmosférica, bem como a temperatura, dentro do laboratório eram medidas durante os ensaios. Com a curva dos valores de pressão dentro da câmara em função do tempo,  $P_c(t)$  (Figura 5.6a), obtida do ensaio, determinava-se a curva da Equação 5.21, mostrada na Figura 5.6b, (onde a constante de tempo,  $\tau$ , é o inverso do coeficiente angular do trecho retilíneo). O coeficiente de permeabilidade do GCL podia então ser determinado a partir da Equação 5.22.

Diferentes pressões iniciais foram testadas para cada corpo de prova e foram feitas repetições dos ensaios para cada pressão inicial. Executado os ensaios e suas repetições, o corpo de prova era imediatamente retirado do equipamento para determinação do teor de umidade no final do ensaio, como detalhado no item 5.3.2. Os resultados dos ensaios de permeabilidade ao gás dos GCLs estão apresentados no Capítulo 6.

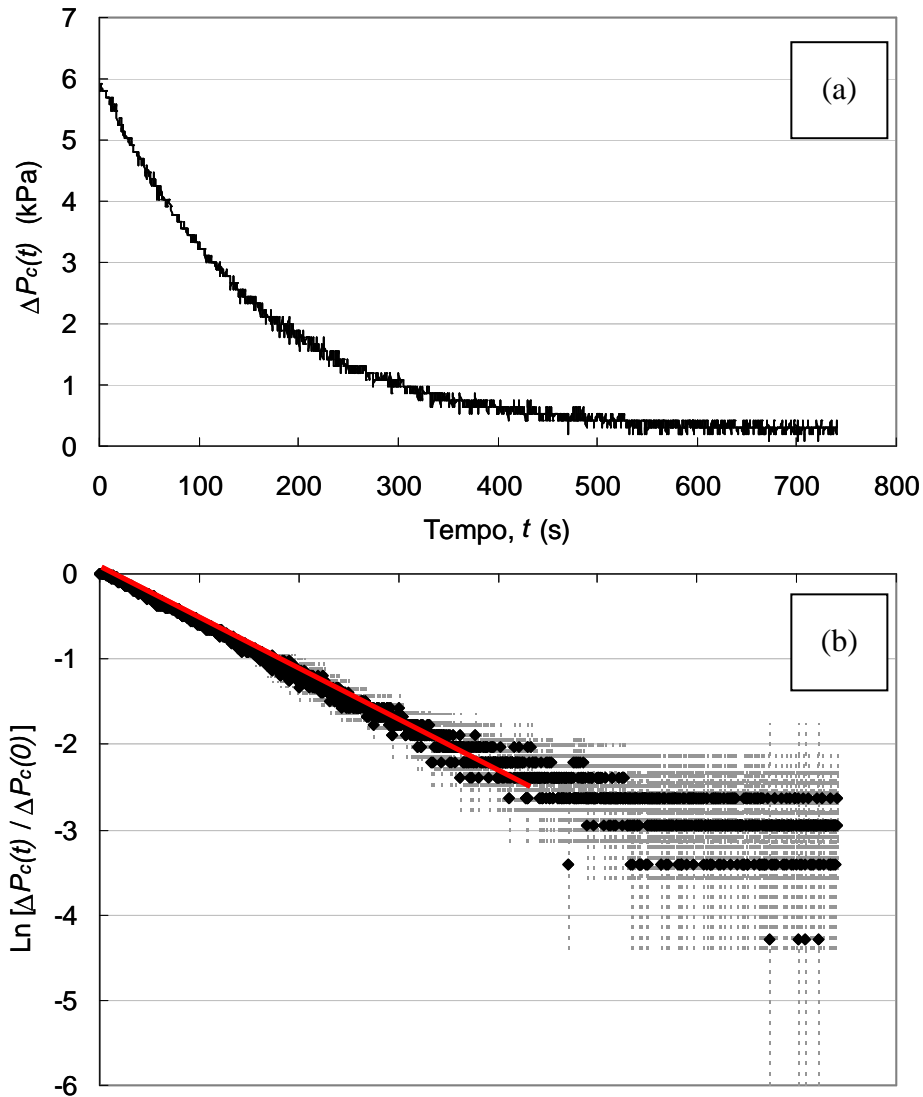


Figura 5.6 – Determinação da permeabilidade ao gás a partir do método da queda de pressão: (a) diferenciais de pressão em função do tempo obtidos pelo sistema de aquisição nos ensaios no permeâmetro de fluxo transiente; (b) traçado da curva da Equação 5.21 para obtenção da constante de tempo  $\tau$ .

### 5.3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova de GCL eram preparados seguindo uma metodologia baseada naquela seguida por Pitanga (2007). Primeiramente amostras retangulares de aproximadamente 550 mm x 550 mm eram cortadas do rolo de GCL na sua umidade higroscópica (natural de fabricação). Cada amostra era pesada com o intuito de estimar sua gramatura. Era desenhada sobre a amostra uma malha de linhas a cada 100 mm na direção da fabricação e transversal à direção de fabricação do GCL, que serviam de “grid” para definir os pontos de medida da espessura da amostra (Figura 5.7a a e). Em cada um dos 16 pontos definidos pelo grid, eram

feitas duas medidas de espessura na amostra ainda seca: primeiramente a 0 kPa de pressão vertical ( $d_{s0}$ ) e em seguida sob 20 kPa de pressão vertical ( $d_{s20}$ ). Finalmente, a amostra era imersa em um tanque com 50 mm de coluna de água (Figura 5.8). Para possibilitar o estudo da influência do teor de umidade na permeabilidade ao gás dos GCLs, o tempo de imersão de cada amostra foi diferente, variando de 2 a 24 horas, dependendo da umidade final desejada para cada corpo de prova. Após o tempo de imersão, a amostra era retirada do tanque e colocada dentro de um saco plástico vedado, no qual era mantida por pelo menos 7 dias, segundo recomendações em AFNOR NF P 84-707 (2005). Com esse procedimento visava-se obter uma distribuição homogênea da umidade em toda a superfície da amostra. O processo de hidratação livre foi escolhido por considerar a situação mais desfavorável em campo, quando a cobertura de solo para a proteção do GCL é colocada algum tempo depois da instalação do GCL. A aplicação da pressão confinante durante a hidratação do GCL resultaria em uma amostra com menor “bulk void ratio”,  $e_B$  (relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos da bentonita+geotêxteis; conceito introduzido por Petrov et al., 1997) e conseqüentemente menor permeabilidade comparado à situação em que o GCL sofre hidratação livre de pressões verticais (Petrov & Rowe, 1997)

Decorrido o tempo de hidratação e homogeneização da amostra de GCL, esta era novamente pesada. Novas medidas de espessura eram feitas nos mesmos pontos previamente definidos pelo grid, agora com a amostra hidratada:  $d_{h0}$  e  $d_{h20}$  para as espessuras medidas sob 0 kPa e 20 kPa de pressão vertical, respectivamente (aplicadas após da hidratação, logicamente). A espessura usada nos cálculos da permeabilidade ao gás do GCL ( $Z$  da Equação 5.22) era a espessura da amostra hidratada posteriormente submetida a 20 kPa de confinamento,  $d_{h20}$ , visto que estas eram as condições do corpo de prova durante o ensaio. As medidas de espessura antes e após a hidratação permitiram verificar a expansão da amostra de GCL devido à hidratação da bentonita em cada ponto do grid. A diferença de espessura entre os 16 pontos da amostra permitiu verificar, ainda, o nível de heterogeneidade da amostra ao longo de sua superfície, uma vez que geralmente GCLs não costumam ser perfeitamente homogêneos (Petrov & Rowe, 1997). Observou-se que para cada amostra de GCL hidratada as 16 medidas de espessura variavam aproximadamente 3% em relação à espessura média do GCL sob tensão confinante de 20 kPa.



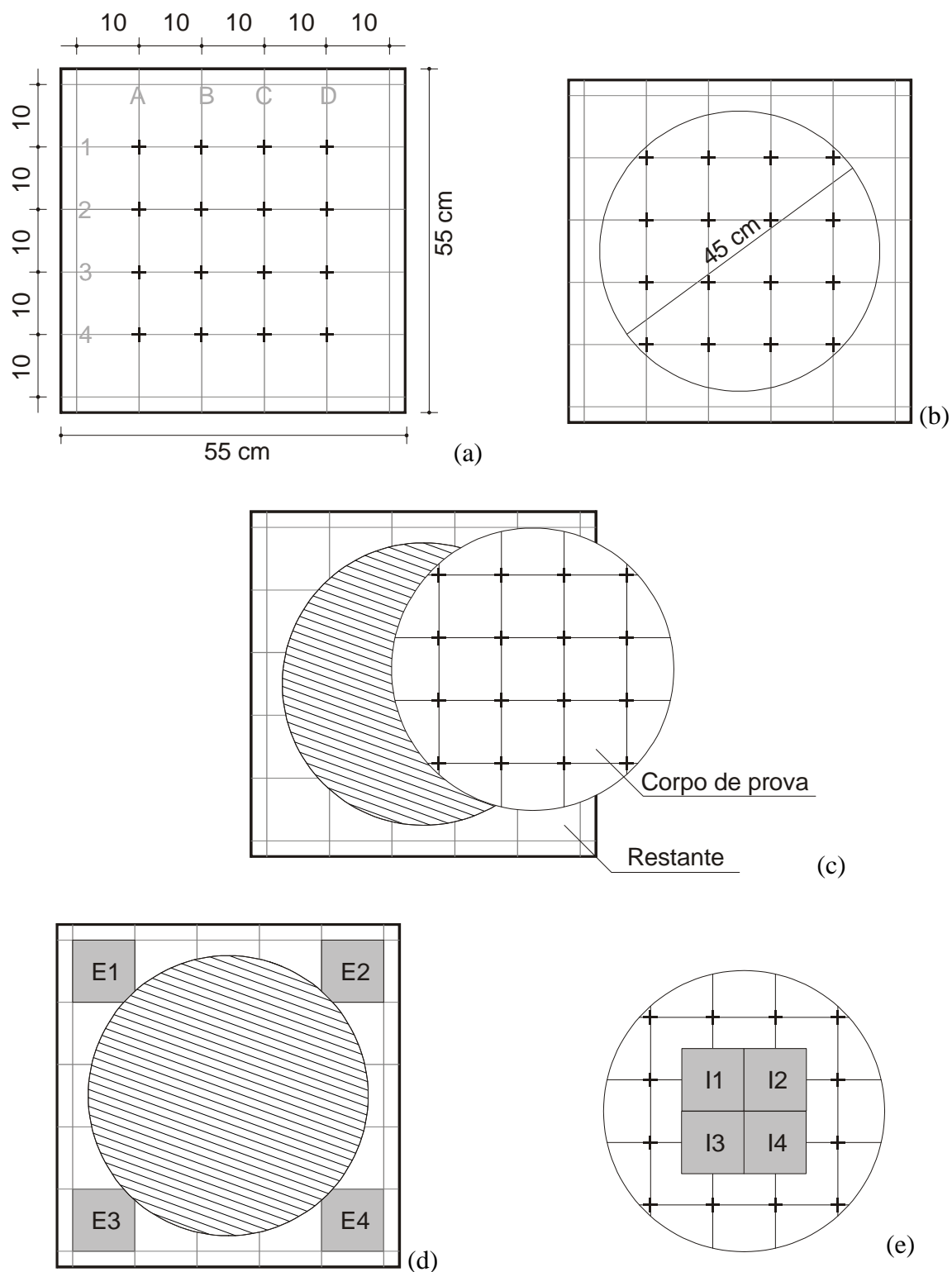


Figura 5.7 – Preparação das amostras de GCL: (a) amostra do GCL com marcações de grid para a determinação da espessura; (b) marcação do corpo de prova nas dimensões do permeâmetro de fluxo transiente; (c) recorte do corpo de prova; (d) amostras retiradas no exterior do corpo de prova para determinação do teor de umidade antes do ensaio; (e) amostras retiradas no interior do corpo de prova, após o ensaio, para determinação do teor de umidade.



Figura 5.8 – Imersão de amostra de GCL em tanque com 50 mm de coluna d'água.

Feitas as medidas de espessura, procedia-se a marcação e o corte do corpo de prova na forma circular, 45,4 mm de diâmetro (Figura 5.7b e c). Após o corte, esse era imediatamente instalado no permeâmetro de fluxo transiente. A superfície restante do GCL era utilizada para determinação do teor de umidade do GCL hidratado, retirando-se 4 amostras retangulares de aproximadamente 100 mm×100 mm, como ilustra a Figura 5.7d. Após o ensaio no permeâmetro de fluxo transiente para a determinação da permeabilidade ao gás do GCL, outras 4 amostras, também de aproximadamente 100 mm×100 mm, eram retiradas do centro do corpo de prova recém retirado da célula para determinação do teor de umidade no fim do ensaio (Figura 5.7e). A comparação entre os teores de umidade antes e depois do ensaio permitia verificar possíveis perdas de umidade devido ao fluxo de gás no decorrer do ensaio. Uma redução média de 6% do teor de umidade foi observada na maioria dos ensaios, exceto para ensaio com a amostra 7 (ver Tabela 5.1), cujas pressões diferenciais iniciais aplicadas foram maiores (o que será detalhado no item 5.5).

#### 5.4 PROGRAMA DE ENSAIOS EXECUTADOS

Foram ensaiados 18 corpos de prova provenientes de três GCLs do mesmo fabricante (Figura 4.1a), diferindo entre si pelo tipo de bentonita constitutiva: 1.S, 1.C e 1.CA (bentonitas sódica natural, cálcica natural e cálcica ativada, respectivamente, como especificado na Tabela 4.1). Os ensaios realizados estão sumariados na Tabela 5.1 e os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 6.



Tabela 5.1 – Programa de ensaios de permeabilidade ao gás de GCLs.

Tipo de GCL*	Número do corpo de prova	Teor de umidade gravimétrica, $w$ (%)	Constante de tempo, $\tau$ (s)
1.S	1	169	0,5
	2	188	1,8
	3	189	4,9
	4	201	17,2
1.C	5	88	0,7
	6	94	26,7
	7	108	35,7
	7b	89	4,7
	8	110	182,9
	9	115	1293,3
1.CA	10	134	0,8
	11	149	13,5
	12	156	11,2
	13	161	13,3
	14	168	177,1
	15	170	414,8
	16	175	643,6
1.CA mod**	17a	170	6,0
	17b	170	414,8
	17c	170	6388,9

Notas: \*Conforme especificado na Tabela 4.1, os tipos de GCL 1.S, 1.C e 1.CA correspondem a GCLs vindos do primeiro fabricante (costurados a cada 37,5 mm) com bentonitas sódica natural, cálcica natural e cálcica ativada, respectivamente; \*\*As amostras 1.CA mod correspondem à GCLs modificados de sua condição original.

## 5.5 ESTUDO SOBRE AS CONDIÇÕES DO ENSAIO

O principal diferencial oferecido pelo equipamento utilizado na presente pesquisa é a possibilidade de estudar a permeabilidade de GCLs sem a necessidade de aplicar altos gradientes de pressão entre duas faces do corpo de prova. Buscando verificar a repetibilidade dos ensaios com GCLs submetidos a diferentes valores de pressão de gás inicial ( $P_c(0)$ ) dentro da câmara, três séries de ensaios foram conduzidas com uma mesma amostra de GCL 1.C com teor de umidade inicial de 108% (Amostra 7 na Tabela 5.1). Essa investigação focou na

influência da pressão inicial  $P_c(0)$  no valor da constante de tempo  $\tau$  determinada em cada repetição do ensaio. A primeira série de ensaios foi executada com o valor de  $\Delta P_c(0)$  variando de 1 a 100 kPa (a diferença de pressão inicial dentro da câmara aumentando a cada novo ensaio). A segunda série de ensaios se iniciou com o maior valor de  $\Delta P_c(0)$  (100 kPa) e as pressões iniciais seguintes foram decrescendo até 1 kPa. Finalmente, na terceira série de ensaios, ainda a mesma amostra foi submetida a 4 estágios crescentes de  $\Delta P_c(0)$ : 2, 10, 50 e 100 kPa, com 8 repetições para cada valor de  $\Delta P_c(0)$ , visando controlar a repetibilidade dos resultados submetidos ao mesmo diferencial de pressão. É importante destacar que estes ensaios (as três séries) foram conduzidos seguidamente na mesma amostra de GCL, sem que esta fosse retirada do equipamento entre um ensaio e outro. Os valores de  $\tau$  correspondentes a cada ensaio foram obtidos por meio da Equação 5.21. A Figura 5.9 mostra os valores de  $\tau$  e de  $\Delta P_c(0)$  para as três séries de ensaio com a amostra 7 de GCL 1.C a 108% de umidade inicial.

Na primeira série de ensaios, observa-se que para as pressões iniciais  $\Delta P_c(0)$  menores que 40 kPa, o valor de  $\tau$  ficou em torno de 30 e 40 s. No entanto, a partir de certa pressão inicial  $\Delta P_c(0)$  maior que 40 kPa, a permeabilidade do corpo de prova começa a aumentar e  $\tau$  chega a atingir um valor menor que 20 s, quando  $\Delta P_c(0)$  é igual a 95 kPa. Depois deste ponto, mesmo nos ensaios conduzidos com pressões iniciais decrescentes (segunda série de ensaios) os valores de  $\tau$  continuam menores do que 20 s. Essa primeira observação sugere uma pressão diferencial maior que 40 kPa pode alterar definitivamente o comportamento do GCL como barreira de gases. Na terceira série de ensaios, verifica-se boa repetibilidade dos resultados para  $\Delta P_c(0)$  de 2, 10 e 50 kPa, com valores de  $\tau$  entre 10 e 20 s, sem reduções significativas de  $\tau$  quando aumentou-se  $\Delta P_c(0)$  entre um estágio de pressão e outro. Nos ensaios feitos com  $\Delta P_c(0)$  entre 80 e 100 kPa não se verificou a mesma repetibilidade: os valores de  $\tau$  variaram de 9 a 4 s, indicando modificações sucessivas do corpo de prova. Na realidade, não foi possível atingir  $\Delta P_c(0)$  de 100 kPa na terceira série de ensaios, como desejado, porque com o aumento da permeabilidade da amostra, diferenciais de pressão iniciais superiores a 85 kPa começavam a decrescer imediatamente após a aplicação da pressão, antes do isolamento da câmara para o início das leituras pelo sistema de aquisição de dados. Os valores de  $\tau$  obtidos para  $\Delta P_c(0)$  entre 85 e 100 kPa decrescem progressivamente a cada ensaio devido à dessecação da amostra de GCL e o desenvolvimento de fissuras, como será discutido adiante nesse trabalho (Capítulo 6).

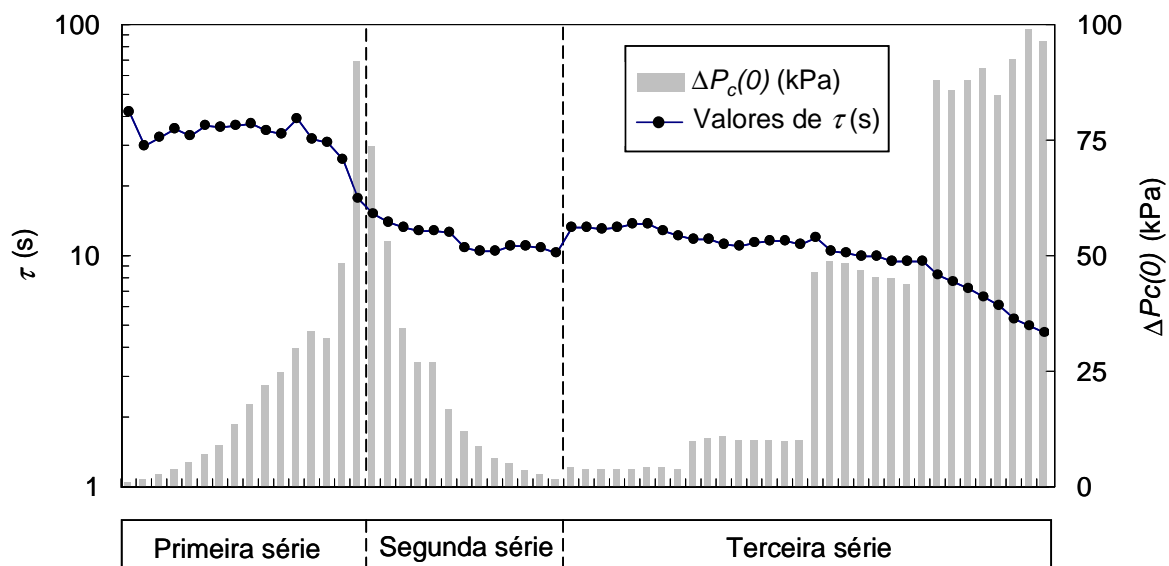


figura 5.9 – Ensaios sequenciais conduzidos na amostra 1.C a 108 % de umidade (corpo de prova 7) para verificar influência da pressão do ensaio no valor de  $\tau$  medido.

Observando a evolução dos valores de  $\tau$  medidos a cada ensaio no conjunto das três séries conduzidas na amostra 7 de GCL 1.C, verificou-se que  $\tau$  reduz de 35,7 s (média dos valores de  $\tau$  determinados na primeira série de ensaios realizados no corpo de prova 7) para menos de 4,7 s (último ensaio da terceira série de ensaios com a mesma amostra). Esta variação de  $\tau$  corresponderia a um aumento da permeabilidade intrínseca do GCL (se negligenciando o transporte por difusão através da amostra) de  $2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  para  $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ , diferença de uma ordem de grandeza. Apesar de se tratar de uma diferença significativa da permeabilidade intrínseca, o valor continua baixo quando comparado a outros materiais, como argila compactada.

Os resultados descritos acima sugerem que diferenciais de pressão iniciais  $\Delta P_c(0)$  maiores de 40 kPa podem alterar o comportamento do GCL no que diz respeito à sua eficiência como barreira de gás. Em ensaios conduzidos em amostras com baixos teores de umidade, Bouazza & Vangpaisal (2003) limitaram o diferencial de pressão a 20 kPa com o intuito de evitar a dessecação do GCL ou expulsão da água dos vazios da bentonita, o que poderia criar caminhos preferenciais de fluxo através da bentonita, aumentando a permeabilidade ao gás. Por causa das fissuras por dessecação, dois GCLs com aproximadamente o mesmo teor de umidade podem apresentar coeficientes de permeabilidade com duas ordens de grandeza de diferença (Bouazza et al., 2006). O mesmo foi observado na presente pesquisa. Finalizadas as três séries de ensaios com a amostra 7 (descritas acima), certa umidade foi verificada no

geotêxtil de proteção sobrejacente à amostra de GCL (instalado para evitar a impregnação da mesma pela areia sobrejacente, vide Figura 5.4), o que não foi observado em ensaios conduzidos com diferenças de pressão menores ( $\Delta P_c(0) < 40$  kPa). Devido às altas diferenças de pressão de gás a que o corpo de prova 7 foi submetido na sequência das três séries de ensaios, parte da umidade do GCL migrou para o geotêxtil sobrejacente de forma que a amostra teve a sua umidade reduzida de 108% (antes dos ensaios) para 89% após a terceira série de ensaios. Na Tabela 5.1 os resultados da amostra 7 são apresentados para duas condições: (i) no início da primeira série de ensaios, quando o teor de umidade era de 108% e a constante de tempo  $\tau$  registrada foi de 35,7 s e (ii) no último ensaio da terceira série, quando a umidade era 89% e a constante de tempo foi de 4,7 s. Devido à modificação significativa do teor de umidade da amostra, essa foi chamada 7b na Tabela 5.1.

É importante discutir a validade da Equação 5.21 usada para a determinação da constante de tempo  $\tau$  quando maiores diferenciais de pressão são aplicados nos ensaios. Na medida em que o diferencial de pressão aumenta, como é o caso dos ensaios com a amostra 7, o valor da pressão média de gás ( $P_m$ , definida como a média entre as pressões máxima e mínima do ensaio, como se verifica na Equação 5.1) também aumenta e o erro em considerar o termo  $P_m/P$  da Equação 5.1 como aproximadamente igual a 1 pode tornar-se significativo.

Sabendo que na situação tipicamente encontrada em aterros sanitários é improvável que pressões diferenciais sejam maiores que 10 kPa (McBean et al., 1995) e concordando com os resultados nos ensaios de repetibilidade conduzidos no corpo de prova 7 com altas pressões de gás na presente pesquisa, os diferenciais de pressão aplicados nos demais ensaios conduzidos foram limitados a 10 kPa, com o intuito de evitar a possível formação de fissuras por dessecação do GCL, bem como a migração de umidade do corpo de prova para o geotêxtil de proteção sobrejacente. O valor adotado está de acordo com o nível de pressões adotadas por Bouazza & Vangpaisal (2003), que limitaram a diferença de pressão inicial em 20 kPa nos ensaios de amostras com teores de umidade relativamente baixos para evitar a dessecação das mesmas. Além disso, diferenciais de pressão mais baixos são mais consistentes com a consideração feita para chegar à Equação 5.2, em que se admite que  $P_m/P$  seja aproximadamente 1 (como discutido no item 5.2).

Para verificar a repetibilidade dos ensaios dentro do domínio de diferenciais de pressão adotado para os demais ensaios ( $\Delta P_c(0) < 10$  kPa), o corpo de prova 15 (GCL 1.CA com umidade de 168%) foi ensaiado com  $\Delta P_c(0)$  de 2, 4 e 6 kPa. A Figura 5.10 apresenta os

resultados em termos de  $\Delta P_c(0)$  e de  $\tau$  para cada repetição, mostrando boa repetibilidade dos valores de  $\tau$  quando as amostras de GCL são submetidas à diferenças de pressão menores.

Os ensaios executados na presente pesquisa permitiram verificar o limite do máximo coeficiente de permeabilidade (ou limite mínimo de  $\tau$ ) mensurável pelo equipamento do ensaio. Em casos de permeabilidades intrínsecas maiores que  $10^{-13}$  m/s a queda da pressão dentro da câmara é muito rápida, menos que 1 s, não permitindo a aquisição de dados suficientes para o traçado da curva da Equação 5.21 para a determinação acurada de  $\tau$  ou cálculo do coeficiente de permeabilidade intrínseca  $k$ .

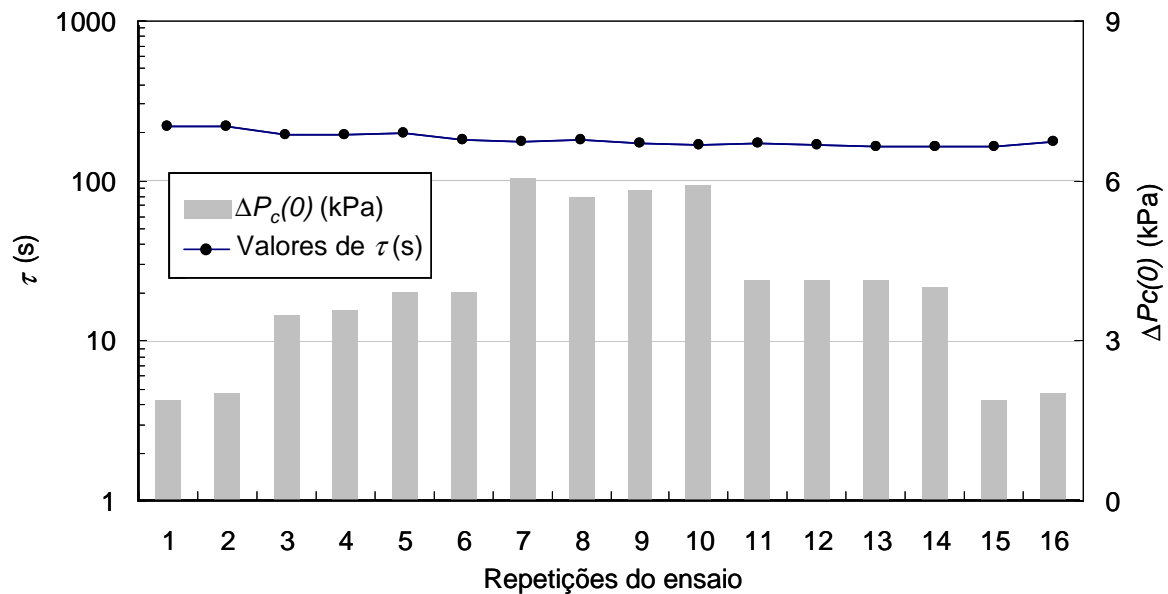


Figura 5.10 – Ensaio de repetibilidade com amostra 1.CA com 168% de umidade.

### 5 METHODOLOGIE DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE GAZ AU TRAVERS LES GCLs

#### Résumé

Le transfert de gaz au travers des matériaux poreux est causé par un gradient de pression ou gradient de concentration de gaz. L'utilisation d'un coefficient de perméabilité,  $k$ , pour la caractérisation du flux de gaz à travers un GCL peut être inconsistante vu que différents mécanismes de transfert peuvent se produire en fonction du niveau de perméabilité: transfert advectif ou transfert diffusif. Pour la caractérisation de la perméabilité au gaz des GCL, il est donc plus logique d'utiliser des grandeurs qui ne dépendent pas du mécanisme de transfert comme le débit de fuite,  $Q$ , ou la constante de temps,  $\tau$ , définie par la loi de variation exponentielle de la pression de gaz dans la chambre amont de l'essai basé sur la méthode de chute de pression (décrite ci-après). La mesure du débit de fuite,  $Q$ , qui traverse le GCL exige l'application d'un haut gradient de pression entre les deux faces du GCL, ce que ne correspond pas aux niveaux de pression typiques des Installations de Stockage de Déchets (ISD). En plus, ces hauts débits peuvent provoquer la dessiccation de l'échantillon pendant l'essai. Pour éviter ces problèmes, on a utilisé dans cette thèse la méthode de la chute de pression qui n'exige l'application que de faibles gradients de pression pour la mesure de la constante de temps,  $\tau$ .

La méthode de la chute de pression consiste à appliquer une différence de pression entre l'amont et l'aval de l'échantillon testé et de suivre au cours du temps la chute de pression amont due au flux de gaz au travers de l'échantillon jusqu'à atteindre l'équilibre des pressions sur les deux faces du matériau. Les bases théoriques de cette méthode et la relation entre  $\tau$  et  $k$  sont présentés au paragraphe 5.2. L'équipement sur lequel les essais de la présente recherche ont été menés est décrit dans le paragraphe 5.3, ainsi que le programme d'essais et la préparation des échantillons (paragraphe 5.4). Une étude sur les conditions des essais est présentée au paragraphe 5.5 avec la mise en évidence d'un gradient de pression maximale à respecter pour ne pas affecter la teneur en eau de l'échantillon : une bonne répétitivité des

résultats est obtenue pour des différences de pression inférieures à 40 kPa. Des gradients plus élevés entraînent une expulsion de l'eau d'hydratation du GCL et en conséquence la modification de la perméabilité de l'échantillon.

En se basant sur cette étude et sur les conditions observées dans les ISD, la pression maximale de 10 kPa a été adoptée pour l'étude de la perméabilité aux gaz des GCLs dans cette recherche.

### **6 RESULTADOS DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE GASES ATRAVÉS DE GCLs**

#### **6.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios de fluxo de gás através de GCLs simulando as condições típicas da cobertura de aterros sanitários. Os ensaios foram conduzidos no permeâmetro de fluxo transiente, equipamento proposto recentemente (apresentado no Capítulo 5) que utiliza o método da queda de pressão no cálculo da permeabilidade intrínseca de GCLs. Foram testados os GCLs costurados 1.S, 1.C e 1.CA (cujas principais características são apresentadas no Capítulo 4) que diferem entre si pela natureza da bentonita: sódica natural, cálcica natural e cálcica ativada, respectivamente. O estudo de três GCLs à base de bentonitas diferentes permitiu verificar se há diferença de permeabilidade ao gás devido à natureza da bentonita. A partir dos resultados obtidos nos ensaios executados, é discutida nesse capítulo a influência da hidratação do GCL na sua permeabilidade ao gás para cada tipo de GCL estudado. São feitas algumas considerações a respeito da influência de fissuras por dessecação da bentonita na permeabilidade ao gás dos GCLs, o que foi verificado em alguns ensaios. Um estudo adicional foi conduzido com o intuito de verificar os efeitos do fluxo de gás na dessecação da bentonita. Os resultados desse estudo são apresentados na sequência. A discussão dos resultados obtidos e as conclusões do estudo do transporte de gases através de GCLs são apresentados no final do capítulo.

#### **6.2 INFLUÊNCIA DA HIDRATAÇÃO DO GCL**

##### **6.2.1 VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE COM A UMIDADE GRAVIMÉTRICA**

Ensaio de permeabilidade ao gás foram feitos em 17 corpos de prova de 3 GCLs diferentes, como sumariado na Tabela 5.1. A hidratação do GCL usado como barreira de líquidos ou gases é um dos fatores mais influentes na sua permeabilidade, portanto cada corpo de prova



era hidratado com um teor de umidade diferente com o intuito de verificar a variação de  $\tau$  em função da umidade (Figura 6.1).

Lembrando que a permeabilidade ao gás é inversamente proporcional à constante de tempo  $\tau$  (Equação 5.22), a Figura 6.1 mostra que quanto maior o teor de umidade do GCL, maior a constante de tempo  $\tau$  e conseqüentemente menor a permeabilidade, como esperado, para os três GCLs estudados. Observa-se uma variação de 3 ordens de grandeza nos valores de  $\tau$  para uma faixa de variação relativamente estreita do teor de umidade dos GCLs compostos de bentonita cálcica natural e cálcica ativada (1.C e 1.CA respectivamente): no caso do GCL com bentonita cálcica natural, 1.C, a variação da umidade gravimétrica foi de 88 a 115% (27 pontos percentuais) e no caso do GCL com bentonita cálcica ativada, 1.CA, a variação da umidade foi de 134 a 175% (41 pontos percentuais). No caso do GCL de bentonita sódica natural (1.S) a constante de tempo parece ser um pouco menos sensível à variação da umidade gravimétrica do GCL. A tendência indica que para atingir valores de  $\tau$  de aproximadamente 1000 s a umidade gravimétrica desse tipo de GCL deveria ficar em torno de 240% (cerca de 60 pontos percentuais maior que a umidade para  $\tau$  igual a 1 s). Esses resultados sugerem que uma incerteza quanto ao teor de umidade gravimétrico de um GCL pode provocar um erro significativo na previsão da permeabilidade, principalmente nos GCLs a base de bentonita cálcica natural.

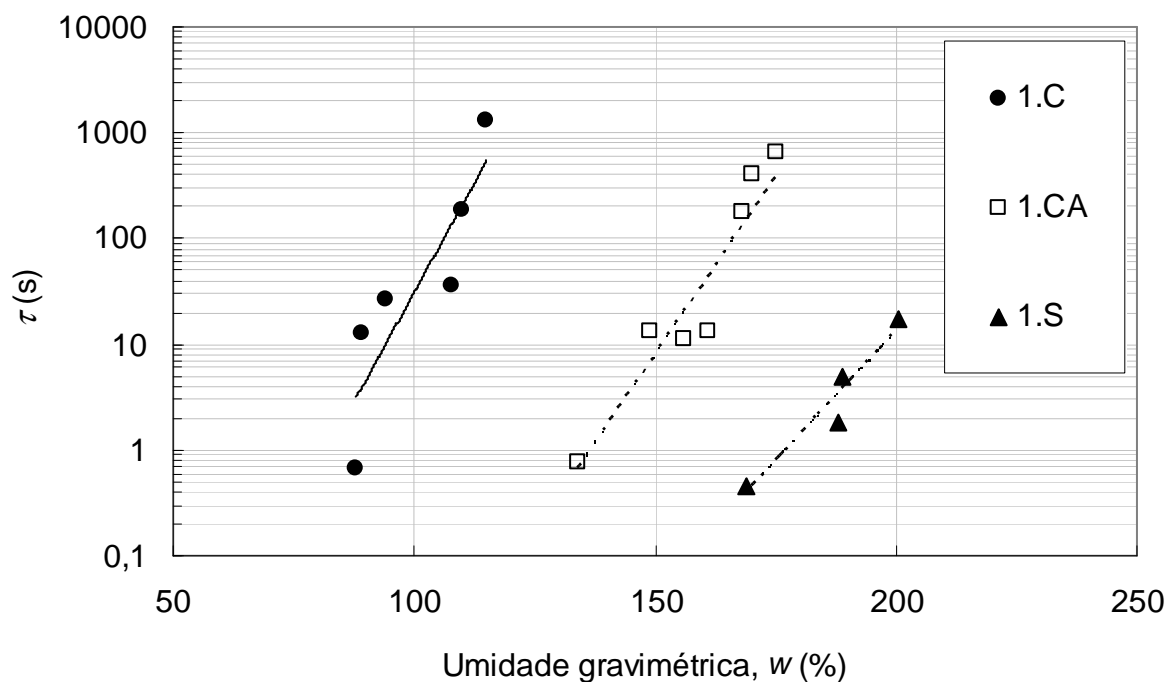


Figura 6.1 – Variação da constante de tempo com a umidade gravimétrica.

Observa-se claramente que a umidade gravimétrica requerida para atingir certo valor de  $\tau$  depende da natureza da bentonita constituinte do GCL. Bentonitas cálcicas naturais demandam menores teores de umidade do que bentonitas cálcicas ativadas e sódicas naturais para atingir uma mesma permeabilidade. Valores de  $\tau$  perto de 10 s (que corresponderiam a um coeficiente de permeabilidade intrínseca em torno de  $5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  para os GCLs em questão) foram atingidos com teores de umidade gravimétrica distintos para cada GCL estudado: 90, 150 e 195% nos GCLs 1.C, 1.CA e 1.S, respectivamente. Da mesma forma, certo teor de umidade gravimétrica que garanta uma permeabilidade muito baixa em um tipo de GCL pode ser insuficiente para garantir a mesma permeabilidade em outro tipo de GCL. Com umidade de 168%, por exemplo, o GCL 1.S apresenta um valor de  $\tau$  mais de duas ordens de grandeza menor que o GCL 1.CA (Figura 6.1).

Entende-se que bentonitas sódicas, por apresentarem maior capacidade de expansão, requerem maior quantidade de água para sua hidratação, devido ao aumento dos vazios entre as camadas dos argilominerais, bem como entre os minerais propriamente ditos. Esse resultado demonstra que a microestrutura da bentonita (que, por sua vez, depende da sua natureza, como mostra a Figura 2.7) influencia de forma significativa a hidratação necessária (em termos de umidade gravimétrica) para que o GCL atinja certa eficiência na função de barreira contra o fluxo de gases.

Apesar da praticidade da obtenção de valores de teores de umidade gravimétricos (relação de massa de água e massa de sólidos), a relação  $\tau(w)$  não parece ser a mais apropriada para o entendimento da permeabilidade ao gás de GCLs, uma vez que a relação de massas não fornece indicações sobre a distribuição do volume de vazios no GCL hidratado, que depende da expansão da bentonita. Duas bentonitas com o mesmo teor de umidade gravimétrica podem apresentar índices de vazios muito diferentes, devido à sua maior ou menor capacidade de expansão. Sendo assim, a porcentagem do volume de água no volume total (umidade volumétrica) é mais importante do que a relação de massas de água e sólidos para o entendimento do transporte de gases através de GCLs, como discute o item 6.2.2 a seguir.

## **6.2.2 VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE COM A UMIDADE VOLUMÉTRICA**

O teor de umidade volumétrico é a relação entre o volume de água e o volume total do GCL e pode ser determinado a partir da Equação 6.1.

$$v = \frac{w \cdot G}{1 + e} \quad (6.1)$$

Sendo

$$e = \left( d_{GCL} - \frac{M_{GS}}{\rho_{GS}} - \frac{M_B}{\rho_B} \right) \cdot \frac{\rho_B}{M_B} \quad (6.2)$$

onde  $v$  é a umidade volumétrica;  $w$  é a umidade gravimétrica;  $G$  é a densidade real dos grãos de bentonita ( $G = 2,61$ );  $e$  é o índice de vazios;  $d_{GCL}$  é a espessura do GCL sob a pressão confinante do ensaio;  $M_{GS}$  é a gramatura dos geossintéticos componentes do GCL;  $\rho_{GS}$  é a massa específica dos filamentos dos geossintéticos ( $\rho_{GS} = 0,91 \times 10^6 \text{ g/m}^3$  para o polipropileno);  $M_B$  é a massa seca por unidade de área da bentonita e  $\rho_B$  é a massa específica dos sólidos da bentonita ( $\rho_B = 2,61 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ ).

Os valores de massa seca por unidade de área da bentonita,  $M_B$ , e dos geossintéticos compondo o GCL,  $M_{GS}$ , usados para o cálculo de  $v$  foram apresentados na Tabela 4.1. O valor médio das 16 medidas de espessura feitas sob pressão confinante de 20 kPa, para cada corpo de prova previamente hidratado ( $d_{h20}$ , como descrito no item 5.3.2), foi usado no cálculo de  $v$  ( $d_{GCL}$  da Equação 6.2 =  $d_{h20}$ ).

A variação da constante de tempo,  $\tau$ , com o teor de umidade volumétrico,  $v$ , está apresentada na Figura 6.2. Os resultados mostram que o aumento da umidade volumétrica vem acompanhado do aumento da constante de tempo  $\tau$  com tendências muito parecidas de  $\tau(v)$  para os três GCLs estudados. Nota-se uma estreita faixa de variação de  $v$  comparada à variação de  $w$  para os valores de  $\tau$  obtidos dos ensaios. A similaridade dos valores de umidade volumétrica de amostras com umidades gravimétricas tão diferentes evidencia a diferença de expansão de cada bentonita resultando em microestruturas bem diferentes. Para a constante de tempo  $\tau$  igual a 10 s, por exemplo, a umidade volumétrica varia no intervalo de 60 a 70% para todos os GCLs estudados, enquanto que a umidade gravimétrica foi de aproximadamente 90, 150 e 195% para os GCLs 1.C, 1.CA e 1.S, respectivamente.

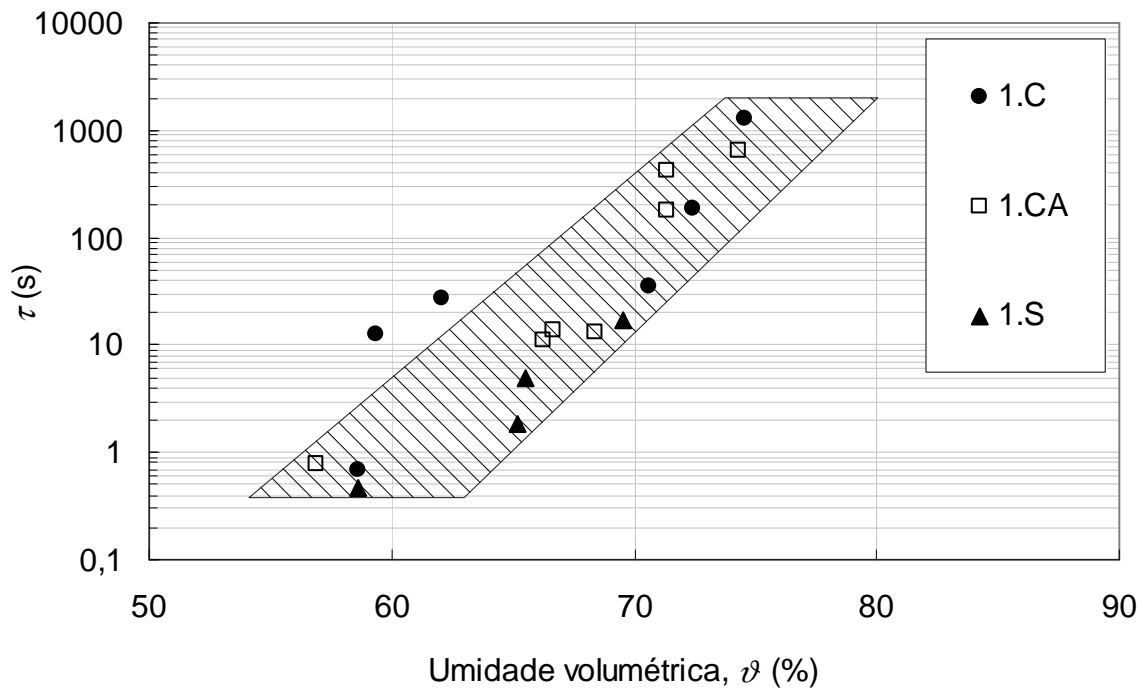


Figura 6.2 - Variação da constante de tempo com a umidade volumétrica.

### 6.2.3 VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE COM A QUANTIDADE DE AR

É sabido que a permeabilidade de materiais porosos depende de sua porosidade, grau de saturação e volume de vazios remanescentes (volume de ar) dentro da estrutura porosa. Prova disso, Didier et al. (2000) observou boa representatividade da relação entre a permeabilidade intrínseca,  $k$ , e a quantidade de ar,  $a$ , da estrutura porosa (como apresentado no Capítulo 3). As equações semi-empíricas do tipo  $k = \alpha \exp \beta a$  propostas pelos autores apresentam coeficientes de correlação 0,95 a 0,98. Vale lembrar que essas equações têm validade limitada aos GCLs e às condições de ensaio da pesquisa de Didier et al. (2000).

Devido às diferentes capacidades de expansão das bentonitas que compunham os GCLs estudados no presente trabalho (vide índice de expansão na Tabela 4.2), bem como às restrições à expansão, como tensão confinante ou o encapsulamento da bentonita entre os geotêxteis do GCL, a distribuição dos volumes de água, ar e sólidos da bentonita hidratada pode ser bastante diferente, mesmo que a umidade volumétrica esteja num intervalo de variação relativamente estreito nos três GCLs estudados. Para um  $\tau$  de 10 s, por exemplo, dependendo do GCL a umidade volumétrica é tal que  $60 < v < 70\%$ , a quantidade de ar,  $a$ , (relação do volume de ar com o volume total) é tal que  $12 < a < 18\%$  e o volume de sólidos ocupa ente 13 e 27% do volume total da estrutura porosa não saturada. A distribuição

aproximada dos volumes ocupados por sólidos, ar e água em cada tipo de GCL para um  $\tau$  de 10 s está apresentada na Figura 6.3. Os volumes de ar,  $a$ , apresentados foram determinados por meio das Equações 6.3 e 6.4 (Didier, 1999; Didier et al., 2000).

$$a = n - v \quad (6.3)$$

sendo

$$n = 1 - \frac{M_B}{\left(d_{GCL} - \frac{M_{GS}}{\rho_{GS}}\right) \cdot \rho_B} \quad (6.4)$$

onde  $a$  é a quantidade de ar;  $n$  é a porosidade;  $v$  é a unidade volumétrica;  $d_{GCL}$  é a espessura do GCL;  $M_{GS}$  é a gramatura dos geossintéticos componentes do GCL;  $\rho_{GS}$  é a massa específica dos filamentos dos geossintéticos ( $\rho_{GS} = 0,91 \times 10^6 \text{ g/m}^3$  para o polipropileno);  $M_B$  é a massa seca por unidade de área da bentonita e  $\rho_B$  é a massa específica dos sólidos da bentonita ( $\rho_B = 2,61 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ ).

No presente trabalho a variação da constante de tempo com a quantidade de ar está apresentada na Figura 6.4. O resultado reforça que a quantidade de ar dentro da matriz porosa deve ser pequena para garantir uma baixa permeabilidade dos GCLs. O número limitado de ensaios com cada tipo de GCL não permite verificar uma tendência definida da relação entre  $\tau$  e  $a$ , mas é possível notar certa diferença dos resultados para cada tipo de GCL. Um mesmo valor de  $\tau$  é obtido com quantidades de ar diferentes dependendo do GCL testado (menores quantidades nos corpos de prova 1.C e maiores quantidades nos corpos de prova 1.S). Didier et al. (2000) também verificaram relações diferentes de  $\tau(a)$ , dependendo do tipo de GCL usado e da pressão de confinamento durante a pré-hidratação dos corpos de prova, mas ressalte-se que os GCLs testados naquela pesquisa eram provenientes de fabricantes diferentes, sendo compostos por geotêxteis também diferentes.

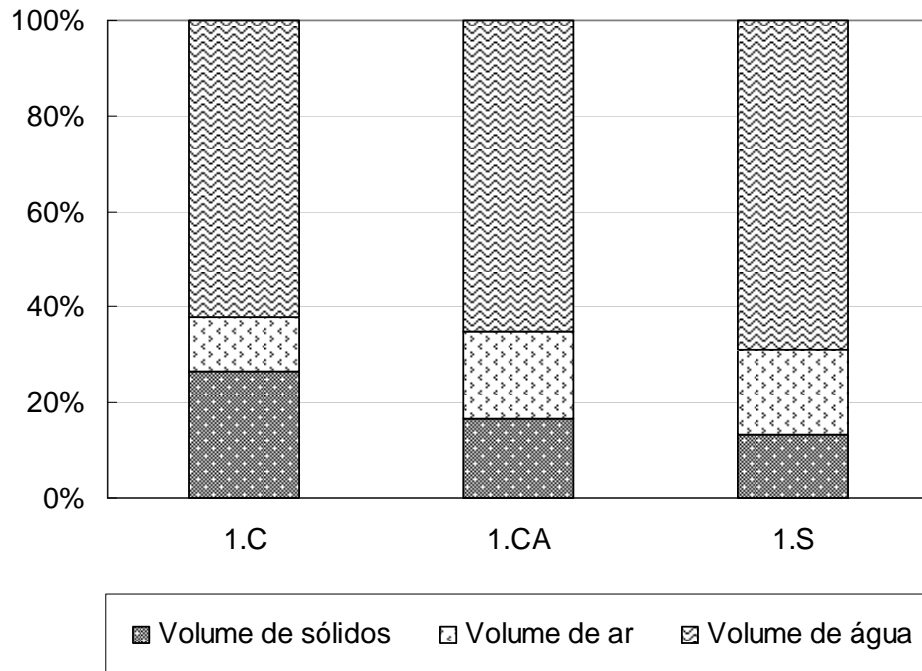


Figura 6.3 – Proporção aproximada de volumes de sólidos, ar e água nos GCLs de bentonita cálcica natural, cálcica ativada e sódica natural, respectivamente, para um  $\tau$  de 10 s.

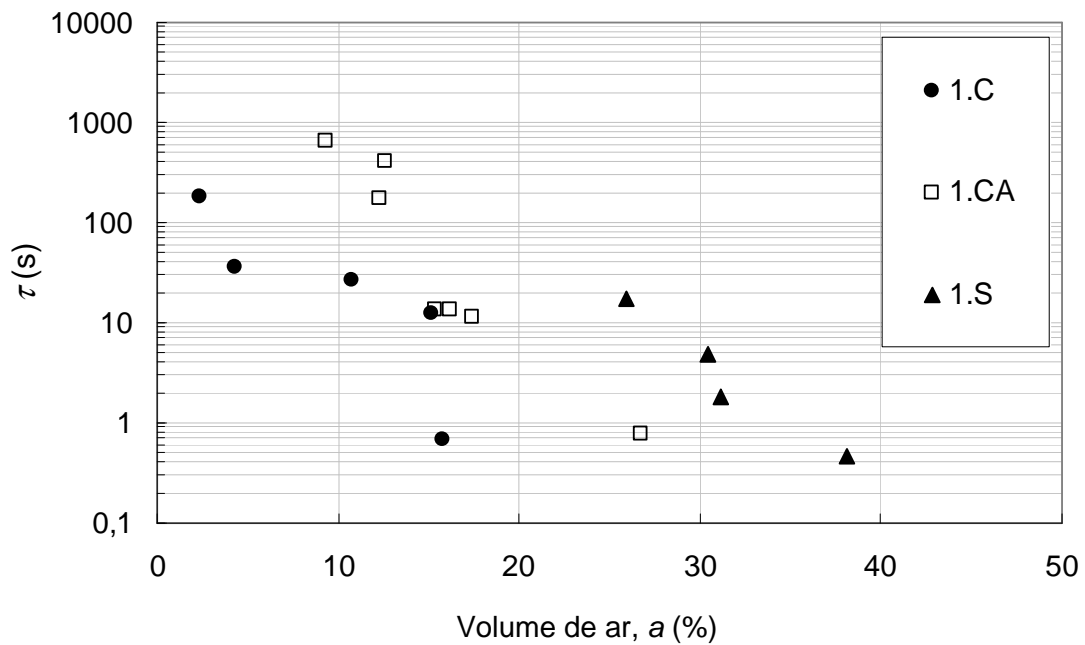


Figura 6.4 – Variação da constante de tempo com a quantidade de ar.

### 6.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS FISSURAS POR DESSECAÇÃO DA BENTONITA

Como comentado anteriormente, fissuras podem ocorrer na bentonita devido à dessecação do material, formando caminhos preferenciais para o vazamento de gás através do GCL, o que aumenta a sua permeabilidade ao gás. No caso de aplicação de grandes gradientes de pressão, pode ocorrer também a migração de água do GCL para o geotêxtil sobrejacente, contribuindo para reduzir a umidade do GCL, como observado nos ensaios com o corpo de prova 7, apresentados no item 5.5. Fissuras devido à manipulação dos corpos de prova durante a preparação dos ensaios ou devido à má distribuição do teor de umidade na área da amostra também contribuem para aumentar a permeabilidade, o que pode explicar dispersões dos resultados nas relações da constante de tempo  $\tau$  com  $w$ ,  $\vartheta$  ou  $a$  apresentadas previamente.

Para verificar a possível formação de fissuras por dessecação nos corpos de prova ensaiados após alguns ensaios executados, o GCL era descosturado para possibilitar a retirada do geotêxtil de cobertura e permitindo a visualização da bentonita hidratada no núcleo do GCL. Algumas fissuras por dessecação e/ou manuseio dos corpos de prova foram observadas nos corpos de prova menos hidratados, cujas constantes de tempo determinadas por meio dos ensaios eram menores que 10 s. A Figura 6.5 ilustra a retirada do geotêxtil da cobertura do corpo de prova 10, que corresponde a um GCL do tipo 1.CA com teor de umidade gravimétrica de 134%.

Para verificar a influência das fissuras na permeabilidade ao gás dos GCLs, três ensaios foram realizados com o corpo de prova 17. O primeiro ensaio foi executado como os demais: um corpo de prova do GCL 1.CA com teor de umidade gravimétrica igual a 170% (Corpo de prova 17a), tendo sido obtido uma constante de tempo,  $\tau$ , igual a 6 s, o que corresponderia a um coeficiente de permeabilidade intrínseca igual a  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ . Em seguida, o corpo de prova foi descosturado para visualização do núcleo de bentonita. Esse procedimento foi feito com o corpo de prova ainda dentro do permeâmetro de fluxo transiente, para evitar que se formassem fissuras adicionais devido ao manuseio do corpo de prova. Foram verificadas algumas fissuras na bentonita do corpo de prova ensaiado, como mostra a Figura 6.6a.

Depois desse primeiro ensaio, as fissuras na bentonita do núcleo do corpo de prova 17a foram cuidadosamente seladas manualmente com a própria bentonita da amostra sem alterar o teor de umidade do GCL e sem adição de bentonita. A Figura 6.6b mostra o aspecto da bentonita

no núcleo do corpo de prova modificado (fissuras seladas), que foi chamado então de 17b. O geotêxtil de cobertura foi recolocado sobre a bentonita (sem as costuras, evidentemente) e um novo ensaio foi feito, obtendo-se uma constante de tempo de 414,8 s, quase duas ordens de grandeza maior que a obtida com o corpo de prova 17a. A relação  $\tau(w)$  do ensaio com o corpo de prova 17b se ajusta bem à tendência obtida para outros corpos de prova retirados do GCL 1.CA (ver Figura 6.1).



Figura 6.5 – Separação das camadas do GCL para visualização do núcleo de bentonita: corpo de prova 10 (GCL 1.CA com 134% de umidade gravimétrica).

Em seguida o mesmo corpo de prova cujas fissuras haviam sido seladas recebeu uma adição de bentonita no núcleo que resultou em um aumento da espessura do GCL de 11,5 mm para 17 mm. O corpo de prova, chamado 17c (adição de bentonita), foi enfim submetido a um terceiro ensaio cujo valor da constante de tempo obtida foi 6388,9 s. A Figura 6.7 apresenta a variação de  $\tau$  com o tratamento dado às fissuras (referentes aos corpos de prova 1.CA mod da Tabela 5.1: 17a, 17b e 17c).



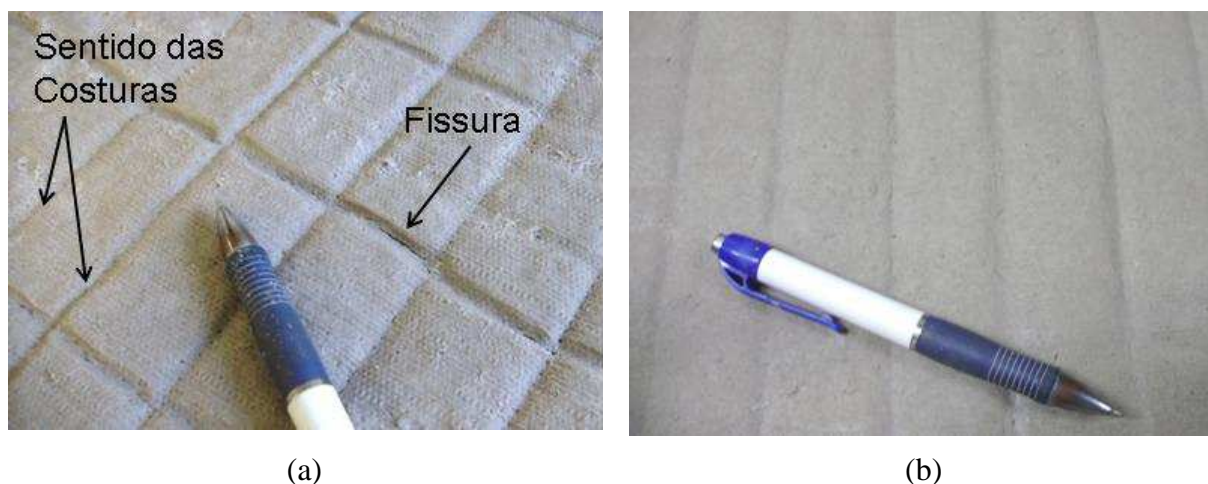


Figura 6.6 – Bentonita no interior de corpos de prova do GCLs 1.CA mod: (a) corpo de prova 17a apresentando fissuras após ensaio e (b) corpo de prova 17b antes do ensaio, com fissuras seladas manualmente.

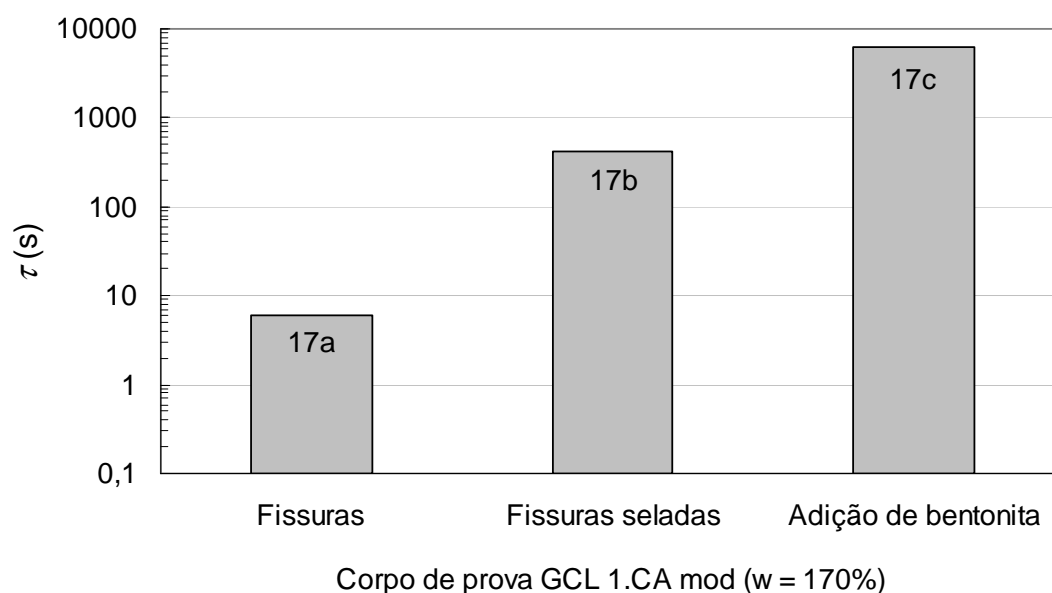


Figura 6.7 – Variação da constante de tempo em função da selagem de fissuras ou adição de bentonita no GCL 1.CA modificado (corpos de prova 17a, 17b e 17c).

Os resultados apresentados acima mostram que valores de  $\tau$  menores que 6 s, (que corresponderiam a coeficientes de permeabilidade intrínseca maiores que  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  para os GCLs estudados) parecem estar associados à corpos de prova cuja bentonita encontra-se fissurada. De fato, nos demais ensaios em que foram determinados valores de  $\tau$  nessa ordem de grandeza foram observadas fissuras na bentonita das amostras no final dos ensaios, como mostra a Figura 6.8 (corpo de prova 1, que corresponde a um GCL 1.S com teor de umidade de 168% - umidade volumétrica de 64%).

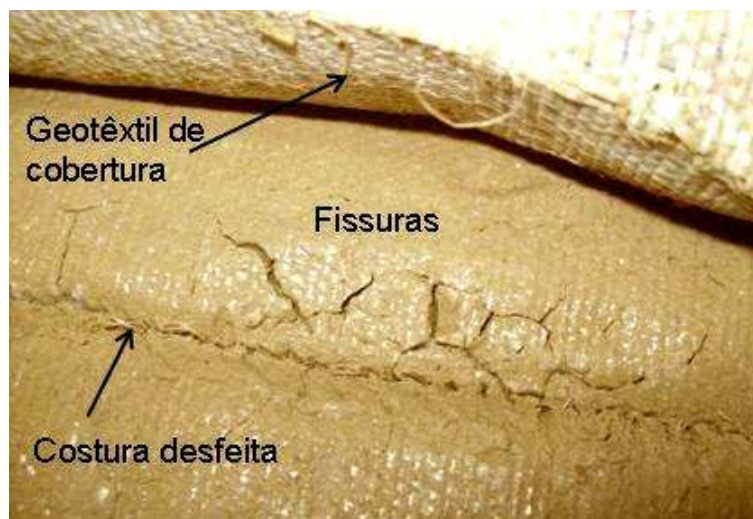


Figura 6.8 – Fissuras observadas após ensaio no corpo de prova 1: GCL 1.S com teor de umidade gravimétrico de 168%.

#### 6.4 ESTUDO DA DESSECAÇÃO DO GCL DEVIDO AO FLUXO DE GÁS

Imagina-se que o fluxo contínuo de gás através do GCL em condições de campo aumenta as fissuras por dessecação, reduzindo a umidade da bentonita. A a hidratação desta última é uma condição muito importante para se obterem baixas permeabilidades ao gás de GCLs, como já comentado por Bouazza & Vangpaisal (2003), Bouazza et al. (2006; 2007), Didier et al. (2000), Pitanga et al. (2009), Shan & Yao (2000) e Vangpaisal & Bouazza (2004). Para verificar a redução da umidade do GCL devido ao fluxo de gás, um ensaio simples foi conduzido com dois corpos de prova de GCL 1.S com 100 mm de diâmetro. O primeiro foi submetido à secagem sob um gradiente de pressão (corpo de prova GP) e o segundo foi submetido à secagem natural (corpo de prova SN). As amostras foram hidratadas de acordo com a metodologia descrita no item 5.3.2 e atingiram teor de umidade gravimétrica de 170%. Cada corpo de prova foi posicionado numa célula com 100 mm de diâmetro sobre uma placa porosa e sob uma camada de areia fina de 100 mm de espessura. O corpo de prova GP foi submetido a um gradiente de pressão de gás  $\Delta P_c(0)$  de 4 kPa durante 3 dias. No mesmo período de tempo o corpo de prova SN, também sobre uma placa porosa e sob a camada de areia fina, não foi submetido a nenhum gradiente de pressão entre as duas faces, como mostrado na Figura 6.9.

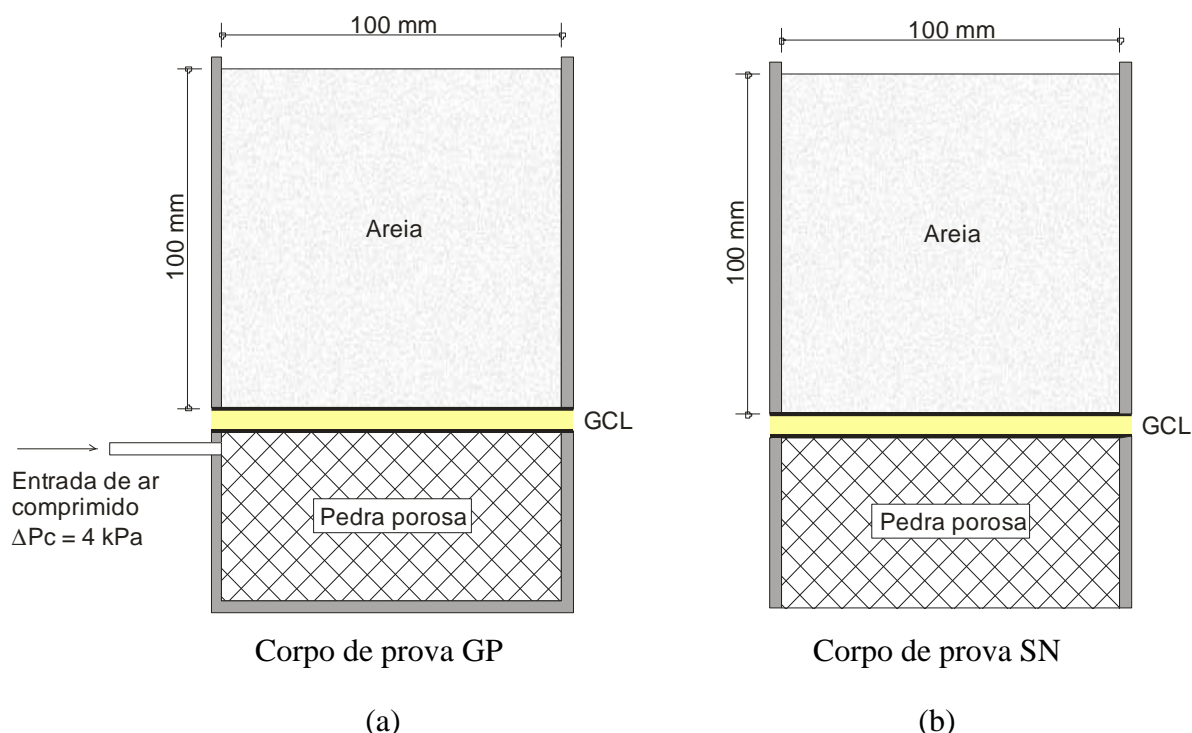


Figura 6.9 – Esquema dos ensaios de dessecação do GCL (a) secagem sob gradiente de pressão de 4 kPa durante 3 dias (b) secagem natural depois de 3 dias.

No final dos três dias de secagem, GP apresentava umidade de 21,5% e SN apresentava umidade de 161,9%. Como sumariado na Tabela 6.1. A significativa diferença dos teores de umidade finais dos corpos de prova GP e SN (sabendo-se que ambos tinham o mesmo teor de umidade no início dos ensaios) se deve à aceleração da dessecação da bentonita devido ao fluxo de gás através do GCL. Os resultados deste ensaio simples confirmam o efeito prejudicial do fluxo de gás através do GCL no que concerne à perda de umidade. Entretanto, é importante lembrar que as bentonitas são capazes de auto-cicatrizas suas fissuras quando em contato com água, desde que não ocorra troca catiônica (Shan & Daniel, 1991; Madsen & Nuesch, 1994; Boardman & Daniel 1996; Lin & Benson, 2000; Bouazza et al., 2007). Quanto maior a capacidade de expansão da bentonita, melhor sua capacidade de auto-cicatrização (Madsen & Nuesch, 1994).

Tabela 6.1 – Ensaios de dessecação do GCL em função do fluxo de gás

Amostra	$\Delta P_c$ (kPa)	$w_0$ (%)	$w_f$ (%)
GP	4	170	21,5
SN	0	170	161,9

Nota: GP = corpo de prova submetido à secagem sob gradiente de pressão;  
SN = corpo de prova submetido à secagem natural

## 6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O equipamento usado no estudo da permeabilidade ao gás de GCLs apresentou boa repetibilidade dos resultados para diferenciais de pressão dentro do domínio das pressões típicas em aterros sanitários (<10 kPa) e se mostrou eficiente para a aquisição da constante de tempo,  $\tau$ . A permeabilidade intrínseca,  $k$ , pode ser determinada por meio de modelo matemático descrito por Li et al. (2004) usando o valor de  $\tau$  determinado em ensaio de laboratório, como descrito no Capítulo 5. Limitações no que diz respeito ao máximo diferencial de pressão a ser aplicado para evitar modificações no corpo de prova, e inclusive para manter válido o modelo matemático proposto, devem ser observadas para garantir a acurácia dos resultados, como discutido anteriormente.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade indicam que para os três GCLs estudados (todos do mesmo fabricante, constituídos dos mesmos geotêxteis, bentonitas de naturezas diferentes e processos de ligação iguais) o aumento do teor de umidade contribui para o aumento da constante de tempo,  $\tau$ , que significa redução do coeficiente de permeabilidade intrínseca do GCL,  $k$ , de acordo com a Equação 5.22. A natureza da bentonita influencia de forma significativa o teor de umidade gravimétrico,  $w$ , necessário para atingir certa eficiência do GCL como barreira de gás. GCLs com bentonitas cálcicas (corpos de prova 1.C) precisam de menores valores de  $w$  para atingir certa permeabilidade, comparados aos GCLs compostos por bentonita cálcica ativada (corpos de prova 1.CA) e sódica natural (corpos de prova 1.S). A espessura pode ser um fator importante nesta diferença, assim como a estrutura das bentonitas (que apresentam diferentes capacidades de expansão) no interior do GCL. Confirmando a importância do teor de umidade combinado à estrutura das bentonitas no núcleo dos GCLs estudados, a relação entre a constante de tempo,  $\tau$ , e o teor de umidade volumétrico,  $v$ , se mostrou praticamente independente do tipo de bentonita dos GCLs. Sendo assim, o estudo da variação da permeabilidade em meios porosos não saturados relacionado à umidade volumétrica parece ser mais coerente, uma vez que o nível de hidratação e a estrutura do material estão embutidos nesse valor. A quantidade de ar,  $a$ , na estrutura porosa se mostrou igualmente relevante para o estudo da variação da permeabilidade de GCLs com o nível de hidratação da bentonita. A permeabilidade de materiais porosos não saturados depende da distribuição desses volumes de ar ao longo da estrutura e especialmente do seu grau de interconexão. Para um mesmo tipo de GCL, o aumento da quantidade de ar vem acompanhado de aumento da permeabilidade (redução de  $\tau$ ). Comparando o comportamento

de materiais diferentes, nota-se que uma mesma quantidade de ar em dois GCLs distintos pode resultar em valores de  $\tau$  uma ordem de grandeza diferentes.

O fluxo de gás através de GCLs pode causar a fissuração da bentonita no seu núcleo em decorrência da dessecação da amostra ou da migração da água de hidratação, forçada devido aos altos diferenciais de pressão. Em ambos os casos há perda de umidade da amostra de GCL com conseqüente aumento da permeabilidade. O mais interessante, porém, foi verificar que amostras de um mesmo GCL, com o mesmo teor de umidade, podem apresentar permeabilidades muito diferentes, devido à ocorrência de fissuras decorrentes do manuseio das amostras durante a preparação dos ensaios (maior ocorrência entre os corpos de prova menos hidratados). É importante destacar, no entanto, que apesar de as fissuras na bentonita poderem reduzir a eficiência dos GCLs como barreira de fluxo de gases, essas podem apresentar capacidade de cicatrização quando em contato com água, capacidade essa proporcional à capacidade de expansão da bentonita.

### 6 RESULTATS DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE GAZ AU TRAVERS LES GCLs

#### Résumé

Dans l'étude de transfert de gaz au travers des GCL, 3 matériaux différents du même fabricant ont été testés sous différentes teneurs en eau. Les 3 matériaux diffèrent par le type de bentonite : sodique naturelle (1.S), calcique naturelle (1.C) et calcique activé (1.CA). L'influence de l'hydratation du GCL, présentée au paragraphe 6.2, indique que la constante de temps,  $\tau$ , augmente 3 ordres de grandeur avec une augmentation relativement faible de la teneur en eau. De part la différence de structure des bentonites, la teneur en eau gravimétrique nécessaire pour atteindre une certaine valeur de  $\tau$  est différente pour chaque type de GCL. En termes de teneur en eau volumique, la relation  $\tau$  versus  $\vartheta$  s'est montrée pratiquement indépendante du type de GCL. Ce résultat prouve que la teneur en eau de la bentonite doit être associée à sa structure pour pouvoir évaluer le niveau d'hydratation des bentonites de nature différente. Le volume d'air dans la structure du GCL a aussi un rôle important sur la perméabilité au gaz de ces matériaux, notamment la distribution du volume d'air et le degré d'interconnexion de ces volumes dans le milieu poreux.

Concernant la dessiccation des échantillons pendant l'essai, le flux de gaz au travers des GCLs peut causer la fissuration de la bentonite ce qui affecte la perméabilité mesurée. Les essais menés avec trois échantillons (paragraphe 6.3) avec la même teneur en eau mais en condition de fissuration variable (fissuré ou avec fissures rebouchées par addition de bentonite en augmentant l'épaisseur du GCL) indiquent des différences de valeurs de  $\tau$  de presque trois ordres de grandeur. Une analyse de la dessiccation a été menée avec des essais très simples où un échantillon de GCL hydraté était soumis à un flux de gaz pendant un trois jours (paragraphe 6.4). La teneur en eau finale, comparée à celle d'un autre échantillon séché à l'air (sans gradient de pression) indique une réduction significative de la teneur en eau due au flux de gaz au travers du GCL. En général, les résultats indiquent que la fissuration due à la perte d'hydratation influence de façon plus sévère la perméabilité au gaz des GCLs que le type de bentonite.

## **PARTE III**

### *Estudo do transporte de líquido através de barreiras compostas*

#### **Capítulo 7..... 128**

*Metodologia do estudo do transporte de líquido através de barreiras compostas*

#### **Capítulo 8..... 138**

*Resultados do estudo do transporte de líquido através de barreiras compostas*

### 7 METODOLOGIA DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE LÍQUIDO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS

#### 7.1 INTRODUÇÃO

A utilização de GCLs na interface entre a geomembrana e a argila compactada, formando uma barreira composta GM-GCL-CCL, é uma opção interessante para a redução de vazamentos através de danos na geomembrana. Além de proteger a geomembrana contra prováveis punçamentos de um material granular, a condutividade hidráulica do GCL é muito baixa, o que reduz a condutividade equivalente da barreira passiva. Além disso, a capacidade de expansão das bentonitas que compõem os GCLs contribui ainda para preencher prováveis espaços vazios ao longo da interface de contato com a geomembrana, ou mesmo selar o dano na mesma.

Pesquisas precedentes sobre o transporte de líquido através de barreiras compostas geralmente se concentraram na verificação da influência das solicitações das obras, como carga hidráulica e pressão confinante sobre a barreira composta. Alguns pesquisadores estudaram a influência dos materiais utilizados. Barroso et al. (2008) estudaram a influência do tipo de geomembrana na barreira composta, como mencionado no Capítulo 3. Estornell & Daniel (1992), Harpur et al. (1993), Barroso (2005) e Barroso et al. (2006) estudaram mais de um tipo de GCL variando os tipos de geossintéticos que compunham os GCLs (geomembrana ou geotêxteis tecidos ou não tecidos), tipo de ligação do GCL (costura, agulhagem ou colagem) e também o tipo de bentonita (granulada ou em pó). No entanto, nenhum estudo foi feito para verificar a influência da natureza da bentonita na transmissibilidade da interface entre a geomembrana e o GCL, sendo que esta é uma característica muito importante para os GCLs no que diz respeito à sua condutividade hidráulica, como confirmam os resultados de Guyonnet et al. (2008; 2009). Segundo estes autores, os GCLs compostos por bentonita cálcica natural apresentam condutividades hidráulicas maiores que GCLs compostos por bentonitas cálcica ativada ou sódica natural. Além disso, a troca catiônica pode ser a causa da transformação de



uma bentonita sódica em bentonita cálcica. Sendo assim seria interessante investigar se essa transformação pode influenciar o fluxo através da barreira composta.

O presente estudo tem, portanto, o objetivo de investigar a possível influência da natureza da bentonita que compõe o GCL no fluxo através de barreiras compostas GM-GCL-CCL e na transmissibilidade de interface GM-GCL. Para este estudo, foram feitos ensaios de fluxo através de barreira composta devido a um dano na geomembrana, variando o GCL da barreira que pode ser a base de bentonita sódica natural ou cálcica natural, sendo fabricado por processos de manufatura diferentes.

O estudo do transporte advectivo de líquidos através de uma barreira composta GM-GCL-CCL devido a um dano na geomembrana permitiu a verificação da evolução da vazão em função do tempo, variando-se o tipo de GCL em contato com a geomembrana. Os resultados obtidos permitiram o cálculo da transmissibilidade da interface GM-GCL e o estudo da qualidade do contato entre os materiais, verificando-se a possível influência das características dos GCLs nos resultados. A metodologia do estudo e o programa de ensaios executados estão descritos nos itens a seguir.

## **7.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE FLUXO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS**

### **7.2.1 EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE FLUXO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS DEVIDO A UM DANO NA GEOMEMBRANA**

O equipamento utilizado para os ensaios de fluxo de líquido devido a um dano na geomembrana através de barreiras compostas GM-GCL-CCL foi disponibilizado pelo laboratório do Cemagref, unidade Antony, França, e está apresentado na Figura 7.1. Este equipamento foi desenvolvido para medir a vazão através da interface entre uma barreira ativa danificada, geomembrana, e uma barreira passiva subjacente, podendo esta ser composta simplesmente de uma camada de argila compactada ou de geotêxteis (Touze-Foltz et al., 2002; Cartaud et al., 2005), ou GCL instalado entre a geomembrana e a camada de argila (Barroso, 2005; Barroso et al., 2006. Mendes et al., 2010).

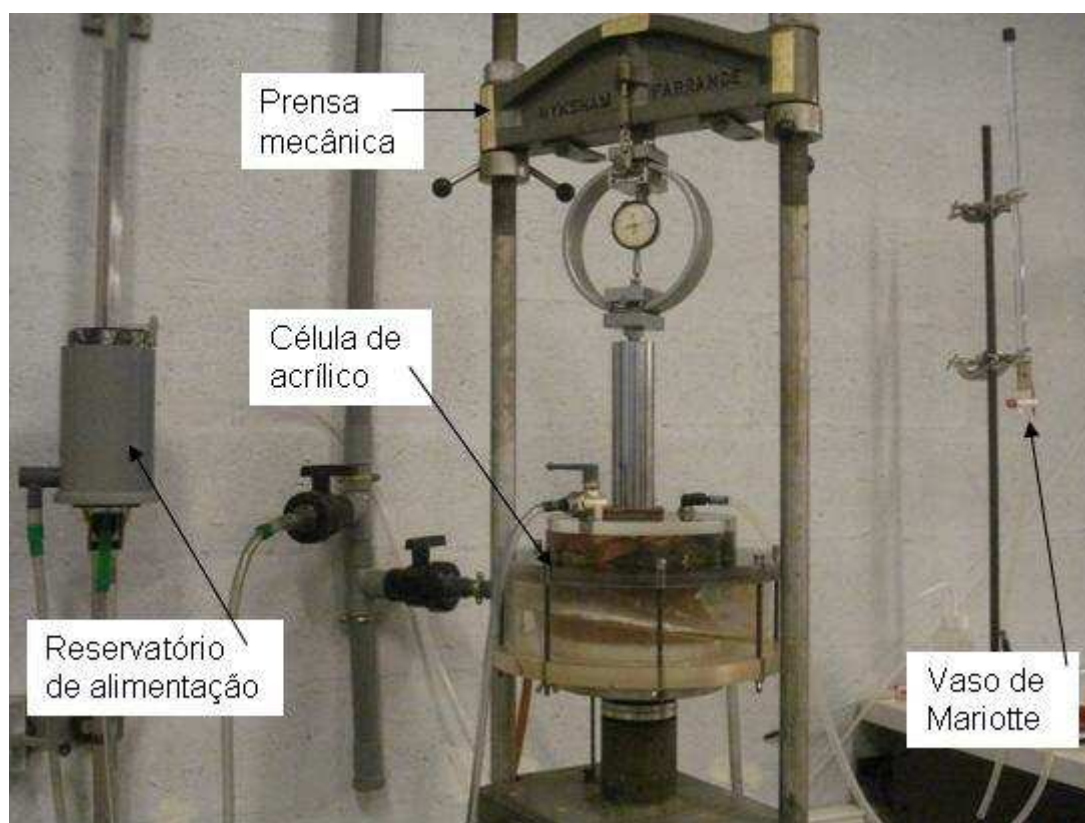


Figura 7.1 – Conjunto do equipamento para ensaio de fluxo através de barreira composta.

O esquema do equipamento está apresentado na Figura 7.2. Como descrito anteriormente por Touze-Foltz (2002), Touze-Foltz et al. (2002), Cartaud et al. (2005), Barroso et al. (2006) e Barroso et al. (2008), a célula de acrílico é composta basicamente por quatro partes: (i) um pistão na base para a aplicação da pressão confinante vertical; (ii) um cilindro inferior com 200 mm de diâmetro interno e 80 mm de altura, que acomoda o solo compactado (CCL) e a amostra de GCL e que recolhe o líquido efluente que percorre a interface GCL-GM e escoar pela lateral do cilindro inferior; (iii) uma camada granular que simula a presença de uma camada drenante sobre a geomembrana e (iv) um cilindro superior que acomoda a camada granular drenante. A geomembrana é posicionada entre os cilindros inferior e superior, que são unidos por hastes rosqueadas fixadas por parafusos. O contorno da geomembrana é colado com silicone ao cilindro superior, impermeabilizando as suas extremidades. Finalmente, a barreira composta na célula é formada pelas seguintes camadas, do topo para a base: camada granular (drenante), geomembrana danificada, GCL e barreira mineral (argila compactada, CCL).

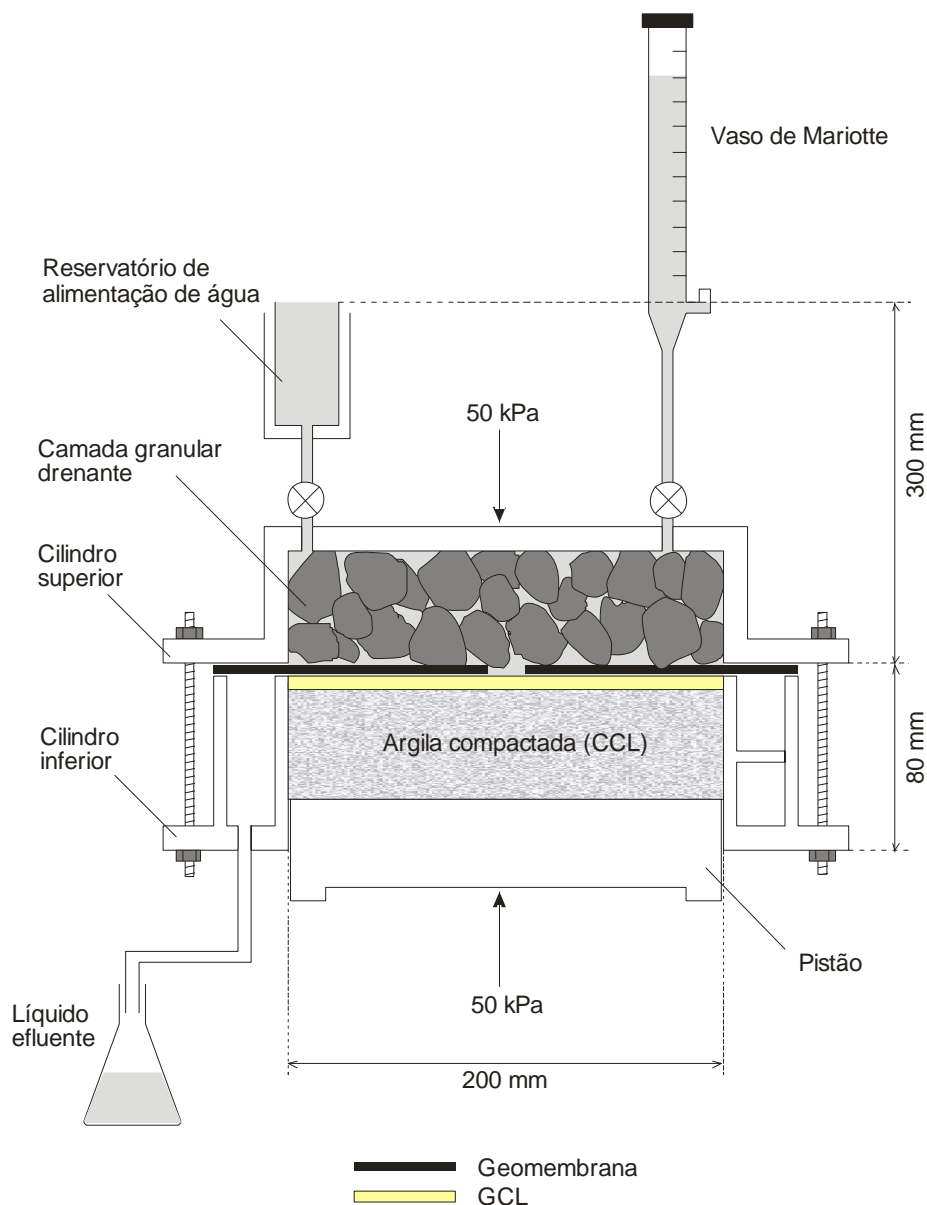


Figura 7.2 – Equipamento de vazamento através de barreiras compostas.

A preparação da barreira mineral (CCL) consiste na compactação de três camadas com 1,5 kg de solo cada, dentro do cilindro inferior da célula instalado de forma invertida sobre um prato metálico rígido. Isso visa garantir uma superfície lisa da face superior da CCL, sobre a qual é instalado o corpo de prova do GCL (Figura 7.3a). As paredes internas do cilindro inferior eram previamente revestidas com graxa com o intuito de reduzir o atrito entre o solo e a célula durante o ensaio, além de impedir possíveis caminhos preferenciais de percolação de líquido na interface solo-célula. O solo, previamente descrito no Capítulo 4, era compactado com uma umidade de aproximadamente 12% (2% abaixo da umidade ótima,  $w_{opt}$ , determinada pelo

ensaio Proctor modificado). O excesso de solo, e suas irregularidades devidas à compactação, eram cuidadosamente cortados a fim de se obter uma superfície lisa também na face que ficava em contato com o pistão e para se obter uma espessura final da barreira mineral (CCL) de aproximadamente 60 mm. Em seguida, a amostra de GCL, previamente cortada, com 200 mm de diâmetro, era instalada dentro do cilindro inferior sobre a camada de argila compactada (CCL), como mostra a Figura 7.3b.

O cilindro superior contendo a camada granular e a amostra de geomembrana (já com o dano circular no centro da amostra) colada à superfície em contato com o cilindro superior era posicionado sobre o cilindro inferior (Figura 7.2). Os dois cilindros eram fixados um ao outro por meio das hastes rosqueadas, ajustadas de forma a garantir a estanqueidade do sistema. A célula era posicionada em uma prensa mecânica para a aplicação da tensão confinante de 50 kPa. O deslocamento do pistão dentro do cilindro inferior permitia o ajuste da posição da barreira mineral até que a pressão de 50 kPa fosse atingida.



Figura 7.3 – Preparação do cilindro inferior : (a) superfície da argila compactada; (b) GCL instalado sobre a argila compactada

Finalmente, o cilindro superior da célula era conectado a um reservatório de água destilada que alimentava o sistema nas primeiras horas de ensaio, quando a vazão era obtida por meio de medidas periódicas do volume de líquido efluente coletado à jusante da célula. As vazões eram obtidas dividindo o volume coletado por períodos de 24 horas. Quando o volume efluente tornava-se imensurável em termos práticos devido à redução progressiva da vazão na interface GM-GCL (valores menores que  $10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ , aproximadamente), o reservatório de alimentação era substituído por um vaso de Mariotte, que alimentava a célula permitindo medidas mais acuradas do volume de água infiltrado através do furo da geomembrana na

barreira composta. As vazões eram calculadas baseando na diferença de volume infiltrado em intervalos de 24 horas. Tanto o reservatório de água usado nas primeiras horas do ensaio quando o vaso de Mariotte que alimentava a célula quando a vazão era menor que  $10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ , podiam ser ajustados de forma a manter a carga hidráulica igual a 0,3 m durante todo o ensaio.

A vazão de líquido infiltrado foi medida durante aproximadamente 250 a 300 horas que, segundo observações nos ensaios e concordando com Barroso et al. (2006), era tempo suficiente para atingir o regime permanente de fluxo (com exceção de dois ensaios em que o regime permanente de fluxo só foi atingido após de 500 a 600 horas de ensaio, como será descrito adiante). A vazão correspondente ao regime permanente de fluxo era usada para o cálculo da transmissibilidade da interface, feito por meio da solução analítica proposta por Touze-Foltz et al. (1999), apresentada no Capítulo 3.

### **7.2.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

Para a obtenção dos corpos de prova de GCL dos ensaios de fluxo de líquidos através de barreiras compostas, primeiramente era feito o recorte de uma amostra retangular de aproximadamente 400 mm×400 mm do rolo de GCL em sua umidade higroscópica. Em seguida, uma fôrma cortante com o diâmetro interno da célula (200 mm) era posicionada no centro da amostra retangular sobre uma prensa, usada para recortar o corpo de prova ainda em sua umidade higroscópica. O perímetro do corpo de prova era previamente hidratado para evitar a perda de bentonita do núcleo durante o procedimento de corte ou durante o manuseio do corpo de prova na preparação do ensaio. O corpo de prova era pesado e sua espessura era medida sob tensão normal de 50 kPa (a mesma aplicada nos ensaios) por meio de uma prensa mecânica e um deflectômetro. O corpo de prova era instalado na célula de ensaio sem pré-hidratação, simulando a condição em que o GCL é instalado no campo com sua umidade natural. Do restante da amostra retangular de 400 mm×400 mm (de onde se retirou o corpo de prova de 200 mm de diâmetro), uma amostra de GCL de aproximadamente 100 mm×100 mm era recortada para a determinação do teor de umidade inicial,  $w_i$ , assumindo que o teor de umidade determinado era igual ao teor de umidade inicial do corpo de prova levado à célula para ensaio.

Após cada ensaio, o corpo de prova recém retirado do equipamento era novamente pesado, e uma nova medida de espessura sob 50 kPa de confinamento era feita, usando o mesmo

procedimento adotado na medida de espessura da amostra na sua umidade natural, antes do ensaio. Em seguida, procedia-se o corte de sub-amostras definidas por um grid com 9 áreas quadradas de 47 mm×47 mm (Figura 7.4), desenhado previamente sobre o corpo de prova, para a determinação do teor de umidade final,  $w_f$ , em cada uma das 9 sub-amostras separadamente. Tal procedimento permite a verificação da homogeneidade da hidratação na superfície do corpo de prova depois de submetido ao fluxo de água durante o ensaio. Inspeções visuais nas amostras ajudaram a identificar regiões de concentração de tensões causadas pelas protuberâncias da camada granular sobrejacente à geomembrana danificada do ensaio.

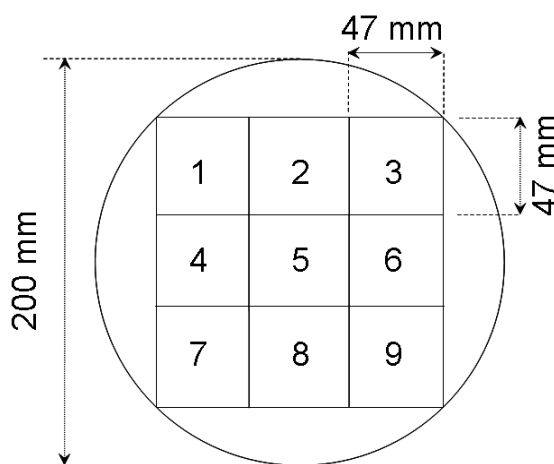


Figura 7.4 – Grid de definição das sub-amostras para determinação da distribuição da umidade final nos corpos de prova ensaiados

O teor de umidade da camada de argila compactada, CCL, sob o GCL foi verificado antes e depois de cada ensaio, pesando-se a massa do grupo cilindro inferior + CCL + pistão. Foram verificados aumentos ou reduções de umidade da CCL de aproximadamente 3%, o que pode ser considerado irrelevante. Barroso et al. (2006) também verificaram variações no teor de umidade da CCL para os ensaios executados, no entanto essas variações também foram consideradas irrelevantes.

### 7.3 PROGRAMA DE ENSAIOS EXECUTADOS

Os ensaios de fluxo através de barreira composta GM-GCL-CCL devido a um dano na geomembrana foram feitos sempre com a mesma geomembrana e o mesmo CCL, variando-se o diâmetro do dano na geomembrana e o tipo de GCL. Foram executados inicialmente ensaios com dano circular de 4 mm de diâmetro e, em seguida, outros ensaios foram feitos com dano maior, de 10 mm de diâmetro. A nomenclatura de cada ensaio segue o padrão X.Y-Z, onde X corresponde ao tipo de fabricação do GCL (1 para GCL costurado e 2 para o GCL agulhado); Y corresponde à natureza da bentonita que compõe o GCL (S para bentonita sódica natural e C para bentonita cálcica natural) e Z é o diâmetro do dano (em milímetros) na geomembrana que compõe a barreira composta do ensaio. Os ensaios realizados estão sumariados na Tabela 7.1 bem como os valores de vazão medidos. Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 8.

Tabela 7.1 – Programa de ensaios de fluxo através de barreiras compostas GM-GCL-CCL.

Código do Ensaio	Tipo de GCL**	Diâmetro do furo na GM (mm)	Tensão confinante (kPa)	Carga hidráulica (m)	Q medida (m <sup>3</sup> /s)
1.S-4	1.S	4	50	0,3	$1,3 \times 10^{-11}$
1.S-10	1.S	10	50	0,3	$1,3 \times 10^{-11}$
1.S-10b*	1.S	10	50	0,3	$6,0 \times 10^{-12}$
1.C-4	1.C	4	50	0,3	$1,4 \times 10^{-11}$
1.C-10*	1.C	10	50	0,3	$1,8 \times 10^{-11}$
2.S-4	2.S	4	50	0,3	$1,2 \times 10^{-11}$
2.S-10	2.S	10	50	0,3	$1,4 \times 10^{-11}$
2.C-4	2.C	4	50	0,3	$1,5 \times 10^{-11}$

Notas: \*Ensaio onde ocorreu superposição do dano mecânico da geomembrana com uma das costuras do GCL; \*\*Conforme especificado na Tabela 4.1, os tipos de GCL 1.S e 1.C correspondem a GCLs vindos do primeiro fabricante (costurados a cada 37.5 mm) à base de bentonitas sódica natural e cálcica natural, respectivamente; 2.S e 2.C correspondem a GCLs do segundo fabricante (agulhados) à base de bentonitas sódica natural e cálcica natural, respectivamente.

### 7 METHODOLOGIE DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE LIQUIDE AU TRAVERS DES ETANCHEITES COMPOSITES

#### Résumé

L'installation d'un GSB entre la geomembrane (GM) et l'argile compactée (AC) des étanchéités composites contribue à réduire l'écoulement de liquides au travers des endommagements inévitables dans la geomembrane (Barroso et al., 2006 ; 2008 ; Estornell & Daniel, 1992 ; Harpur et al., 1993). L'étude du transfert de liquides au travers des étanchéités composites GM/GSB/AC a été menée en cherchant à analyser l'influence du type de GSB dans l'écoulement sous des sollicitations mécaniques et hydrauliques représentatives du fond des ISD. L'équipement d'essai et la méthode de préparation des échantillons sont présentés au paragraphe 7.2. Le programme d'essais est décrit au paragraphe 7.3.

Plusieurs configurations d'étanchéités composites, en variant le type de GSB (par rapport au type de fabrication, aiguîtés ou cousus et par rapport à la nature de la bentonite, sodique naturelle, calcique activée et calcique naturelle) et le diamètre de l'endommagement de la GM (4 ou 10 mm) ont été prévues dans le programme d'essais (Tableau 7.1). L'équipement utilisé a été conçu pour mesurer le débit de liquide au travers d'une étanchéité composite dû à un endommagement dans la geomembrane. 4,5 kg d'argile compacté (AC) ont été compactés pour chaque essai dans une cellule de 20 cm de diamètre sur une épaisseur d'environ 60 mm, sur laquelle était installé l'échantillon de GSB non pré-hydraté. Une géomembrane percée était ensuite posée sur le GSB préalablement à la mise en place d'une plaque de résine époxy incluant des granulats pour simuler la présence de la couche drainante sur la géomembrane. L'étanchéité composite était soumise à une contrainte mécanique de 50 kPa. L'application de la charge hydraulique constante de 0,3 m était assurée par un bac à niveau constant contenant de l'eau distillé ou par un vase de Mariotte. Pendant les premières heures d'essai l'écoulement d'eau à l'aval de l'interface de l'étanchéité composite pouvait être quantifié. Pour les débits plus faibles apparaissant pour des temps d'essai plus longs, le bac à niveau constant était remplacé par un vase de Mariotte permettant la mesure précise du volume d'eau infiltré.



Les essais étaient suivis jusqu'au moment où le régime permanent était atteint. A la fin de chaque essai, l'échantillon de GSB était découpé en 9 parties dans le but de déterminer la répartition spatiale de la teneur en eau dans l'échantillon. La variation de la teneur en eau de l'argile compacté (AC) pendant l'essai était vérifiée. Des augmentations ou réductions de 3% vérifiées dans la teneur en eau d'AC ont été considérées non relevant.

### 8 RESULTADOS DO ESTUDO DO TRANSPORTE DE LÍQUIDO ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS

#### 8.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios de fluxo de líquido através de barreiras compostas GM-GCL-CCL devido a um dano na geomembrana. Quatro tipos de GCLs foram testados: 1.S, 1.C, 2.S e 2.C, cujas características principais são apresentadas no Capítulo 4. As diferenças entre esses GCLs consistem basicamente no modo de fabricação (costurados ou agulhados) e na natureza da bentonita constituinte (sódica natural ou cálcica natural). O diâmetro do dano na geomembrana era de 4 ou 10 mm. O padrão de nomenclatura dos ensaios está definido no item 7.3 no capítulo anterior.

A variação do tipo de GCL submetido ao ensaio permitiu verificar possíveis influências do processo de manufatura e da natureza da bentonita na vazão através da barreira composta. O estudo de GCLs à base de bentonitas de naturezas diferentes permitiu também discutir a influência das trocas catiônicas, que transformam a bentonita sódica em cálcica, no fluxo através de barreiras compostas. Os valores de vazão verificados nos ensaios foram utilizados no cálculo da transmissibilidade da interface GM-GCL e verificação das condições de contato na interface entre esses dois materiais. Por fim, os valores de transmissibilidade determinados por meio de solução analítica foram utilizados na previsão da vazão através de barreiras compostas em configurações típicas do fundo de aterros sanitários. A discussão sobre a influência das características do GCL usado na barreira composta bem como as conclusões do estudo do transporte de líquido através de barreiras compostas devido a um dano na geomembrana estão apresentadas no final deste capítulo.

## **8.2 ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

### **8.2.1 REDUÇÃO DO FLUXO DEVIDO À EXPANSÃO DA BENTONITA**

A Figura 8.1 apresenta os valores de vazão medidos para ensaios de fluxo através de barreira composta devido a um dano de 4 mm de diâmetro na geomembrana, onde verificou-se a mesma tendência de fluxo para as quatro amostras de GCL testadas, independente da natureza da bentonita ou tipo de fabricação do GCL. Nas primeiras horas de ensaio, as vazões através da barreira composta GM-GCL variaram entre  $10^{-7}$  e  $10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s. Considerando que a bentonita encontrava-se inicialmente em sua umidade natural (não era feita pré-hidratação das amostras de GCL antes dos ensaios), a água passando através do furo na geomembrana não encontrava maiores dificuldades para escoar ao longo da interface entre a geomembrana e o GCL subjacente. No entanto, a medida em o GCL se hidratava com a água proveniente do vazamento, a expansão da bentonita provocava o aumento da espessura do GCL, reduzindo os espaços vazios da interface transmissível entre a geomembrana e o GCL, reduzindo conseqüentemente a vazão na interface.

A queda mais rápida da vazão ocorria nas primeiras 50 horas de ensaio, quando atingia valores em torno de  $10^{-10}$  m<sup>3</sup>/s, três ordens de grandeza menores que as vazões iniciais. Após 100 horas de ensaio a vazão reduzia lentamente até se atingir o regime de fluxo permanente, aproximadamente 200 horas depois do início do ensaio. As vazões finais, em regime permanente de fluxo, foram em torno de  $10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s para os quatro GCLs testados, como se verifica na Figura 8.1. A ordem de grandeza das vazões em regime de fluxo permanente obtidas nos ensaios da presente pesquisa foi a mesma obtida por Barroso (2005) e Barroso et al. (2006), em ensaios conduzidos no mesmo equipamento como apresentado no item 3.2.4.

### **8.2.2 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DO DANO NA GEOMEMBRANA**

Nos ensaios de fluxo através da barreira composta com o diâmetro do dano na geomembrana igual a 10 mm de diâmetro, foram obtidas as curvas apresentadas na Figura 8.2. As cinéticas de redução da vazão em função do tempo para os GCLs de bentonita sódica natural dos GCLs agulhado e costurado (ensaios 1.S-10 e 2.S-10) foram similares. No entanto, um comportamento diferente foi observado no ensaio com o GCL costurado à base de bentonita cálcica, como mostra a curva do ensaio 1.C-10 na Figura 8.2.

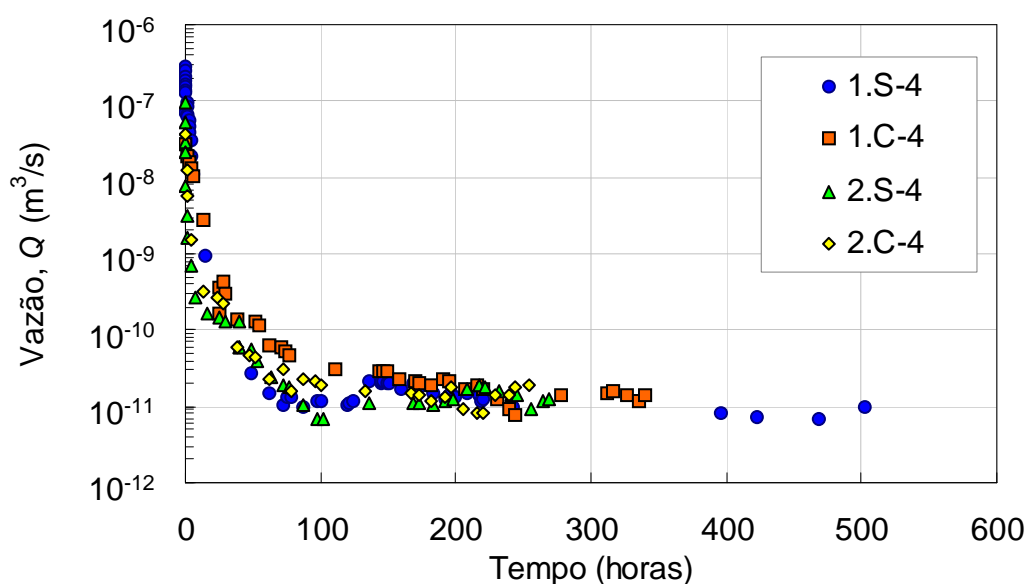


Figura 8.1 – Vazões através de barreiras compostas para um furo de 4 mm na geomembrana.

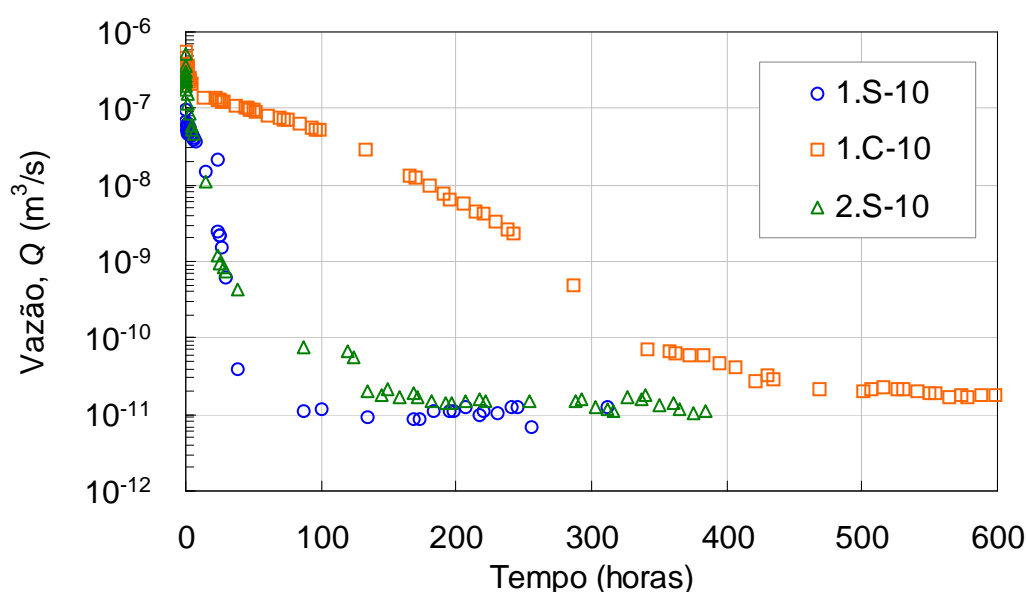


Figura 8.2 - Vazão através da barreira composta versus tempo para um furo de 10 mm na geomembrana.

Nos ensaios 1.S-10 e 2.S-10 reduções significativas de vazão foram observadas nas primeiras 50 horas de ensaio, com menores reduções nas horas seguintes até que fossem atingidas as condições de regime permanente de fluxo, aproximadamente 200 horas depois de iniciado o ensaio. Entretanto, no ensaio 1.C-10 a vazão na interface não sofreu a brusca redução inicial e o regime permanente só foi atingido após 500 horas de ensaio (tempo duas vezes maior que o verificado nos demais ensaios). A diferença dos resultados do ensaio 1.C-10, no entanto, esteve limitada ao estágio de regime transiente de fluxo, como mostra a Figura 8.2. Apesar

das maiores vazões iniciais e do maior tempo necessário para atingir o regime permanente, a vazão final foi da mesma ordem de grandeza dos demais ensaios. Entretanto, antes das 500 horas de ensaio o volume de água perdido no ensaio 1.C-10 foi mais de duas vezes maior que o volume acumulado nos demais ensaios. É verdade que os volumes de líquido percolado através da barreira composta são relativamente pequenos, mas a repercussão desta diferença de volumes seria maior em condições de campo se o número de danos na geomembrana fosse também maior, resultando em uma menor eficiência da barreira neste caso.

É importante atentar para o fato de que nas condições de campo, as dimensões e forma de danos nos geossintéticos podem mudar devido a tensões a que as geomembranas estão submetidas (Mendes et al., 2007). Essas tensões devem ser evitadas ou minimizadas em qualquer utilização desses materiais.

### **8.2.3 CAMINHOS PREFERENCIAIS DE FLUXO ATRAVÉS DA INTERFACE**

A não uniformidade do contato entre a geomembrana e o GCL pode causar caminhos preferenciais de fluxo na interface transmissível. As costuras dos GCLs, a não uniformidade da distribuição da bentonita ao longo da superfície do GCL (Petrov & Rowe, 1997), as rugas na geomembrana (Rowe, 1998) entre outros, são fatores que contribuem para o aparecimento de caminhos preferenciais de fluxo ao longo da interface de contato entre a geomembrana e o GCL. Esses caminhos preferenciais podem aumentar o vazamento através da barreira composta, especialmente quando o dano na geomembrana coincide com um desses caminhos preferencial. No caso de uma rede interconectada de caminhos preferenciais, como rugas na geomembrana (Rowe, 2007), os vazamentos na interface podem aumentar significativamente.

Ao final do ensaio 1.C-10, na desmontagem do equipamento, observou-se que o dano na geomembrana estava superposto ao alinhamento de uma das costuras do GCL 1.C subjacente, o que favoreceu a formação de um caminho preferencial de fluxo ao longo da costura (Figura 8.3). Com o fluxo concentrado em uma região estreita da interface de contato GM-GCL, o processo de hidratação do GCL foi mais lento, aumentando o tempo necessário para atingir o regime de fluxo permanente. Além disso, a distribuição não uniforme da bentonita na superfície do GCL também parece favorecer a formação de caminhos preferenciais de fluxo, uma vez que a expansão do GCL não será uniforme em toda a superfície de contato com a geomembrana. A Figura 8.4 ilustra algumas regiões de má distribuição da bentonita no núcleo do GCL 1.C. A associação de uma má distribuição da bentonita com um processo de ligação

por costura do GCL 1.C pode ter sido a razão pela qual a redução das vazões medidas no ensaio 1.C-10 foi tardia comparada aos demais ensaios.



Figura 8.3 – Caminhos preferenciais de fluxo ao longo das costuras.



Figura 8.4 – Distribuição não uniforme da bentonita no núcleo do GCL 1.C.

A não uniformidade do fluxo através da interface GM-GCL verificada nos resultados da presente pesquisa, foi também verificada por Barroso et al. (2006) e Touze-Foltz et al. (2002), que estudaram a forma da área molhada do GCL. Em um de seus ensaios, assim que o regime permanente de fluxo foi atingido, um corante azul foi adicionado à água do reservatório de alimentação da célula, permitindo a visualização dos caminhos preferenciais de fluxo na superfície do GCL (Figura 8.5). Os resultados indicam que a interface transmissível não é uniforme, sugerindo uma limitação da solução analítica descrita no item 3.2.2, que assume

que a área molhada devido ao vazamento pelo dano na geomembrana é axissimétrica e que a interface de transmissibilidade é uniforme.

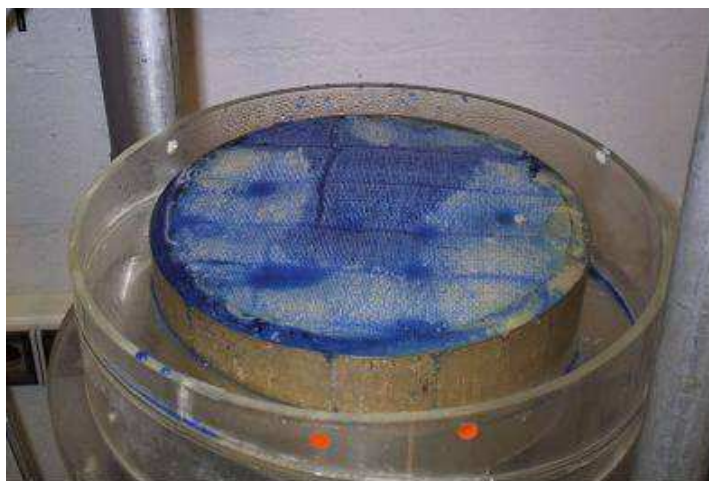


Figura 8.5 – Visualização da forma da área molhada dos GCLs após ensaio de transmissibilidade (Touze-Foltz et al., 2002)

Os caminhos preferenciais de fluxo, especialmente quando encontram o dano na geomembrana, implicam em vazamentos maiores através da interface GM-GCL. É, portanto importante evitar a formação desses caminhos preferenciais buscando tanto quanto possível a uniformidade do contato na interface. Nesse contexto, a hidratação do GCL sob confinamento pode evitar que os GCLs costurados (primeiro fabricante) se expandam na forma de “travesseiro” como mostrado por Bouazza & Vangpaisal (2004) no item 3.1.2. No caso de GCLs agulhados (segundo fabricante) a expansão tende a ocorrer de forma mais homogênea ao longo da superfície do GCL.

#### **8.2.4 ESTUDO DAS CONSEQUÊNCIAS DE SOBREPOSIÇÃO DO DANO E COSTURA**

Para verificar o comportamento da interface nas condições de caminhos preferenciais de fluxo ao longo da costura do GCL do primeiro fabricante, como verificado no ensaio 1.C-10, foi feito um ensaio adicional forçando a sobreposição do dano da geomembrana ao alinhamento de uma das costuras de um GCL: Ensaio 1.S-10b (Figura 8.6). A escolha do GCL 1.S para este ensaio possibilitou a comparação das vazões nos casos de sobreposição ou não do dano na geomembrana com um caminho preferencial de fluxo (comparando-se os resultados dos ensaios 1.S-10 e 1.S-10b) e a verificação de uma possível influência do tipo de bentonita no

vazamento quando o furo na geomembrana coincide com o caminho preferencial de fluxo (comparando-se os resultados dos ensaios 1.S-10b e 1.C-10, ambos com superposição do dano da geomembrana com uma costura).

Os resultados dos ensaios executados com GCL de bentonita sódica natural com o dano da geomembrana sobreposto ou não a uma das costuras do GCL (Ensaio 1.S-10b e 1.S-10 respectivamente) mostram que, embora o caminho preferencial de fluxo ao longo da costura aumente o tempo necessário para que o regime de fluxo permanente seja atingido, as vazões finais nos dois ensaios são semelhantes, em torno de  $10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s. No ensaio 1.S-10b (com sobreposição), uma brusca redução da vazão entre 100 e 150 horas de ensaio é observada, diferente do ensaio 1.S-10 (sem sobreposição) onde a redução da vazão ocorreu logo no início do ensaio com as vazões finais tendo sido atingidas em torno de 100 horas do início do ensaio.

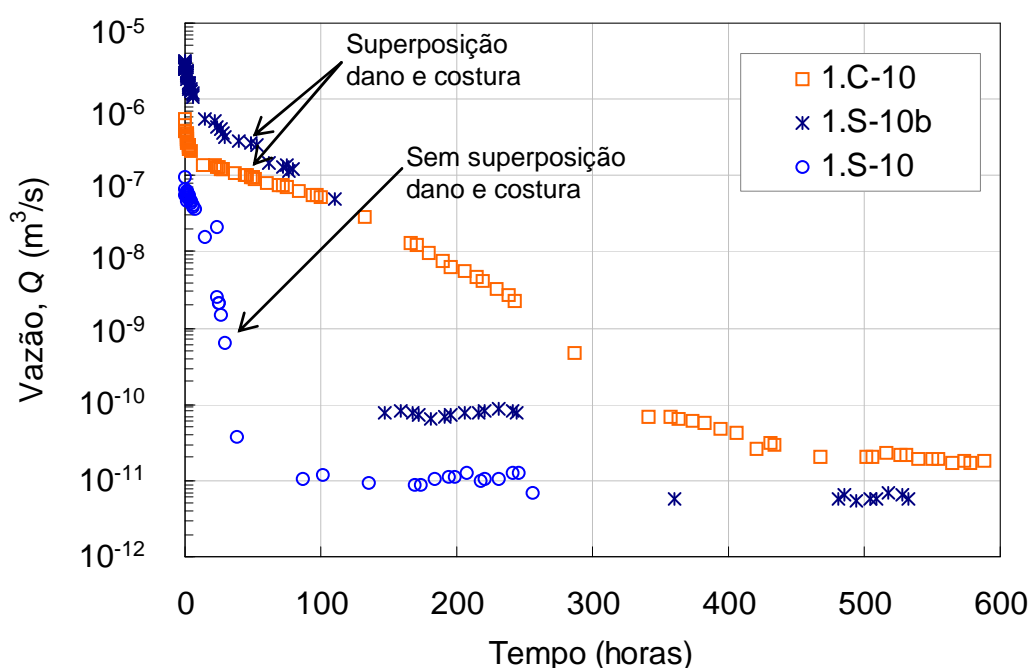


Figura 8.6 - Vazão através da barreira composta versus tempo para furo de 10 mm coincidindo com costura dos GCLs 1.S e 1.C.

Comparando o resultado dos ensaios 1.S-10b com 1.C-10, ambos com sobreposição do dano com uma costura do GCL, buscou-se verificar se a natureza da bentonita influenciou a vazão em caso de o dano na geomembrana coincidir com um caminho preferencial de fluxo na interface. A Figura 8.6 mostra que até 150 horas de ensaio os valores de vazão medidos nos



ensaios 1.C-10 e 1.S-10b foram próximos. O comportamento similar no início dos ensaios reforça a hipótese de que em ambos os ensaios o fluxo ocorre preferencialmente ao longo das costuras dos GCLs no início do vazamento **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Entretanto, apesar da similaridade nos valores iniciais da vazão, para o GCL de bentonita sódica (Ensaio 1.S-10b), foi verificada uma redução brusca de 3 ordens de grandeza na vazão aproximadamente 150 horas depois do início do ensaio. Após o final desse ensaio, na desmontagem do equipamento, verificou-se que a expansão da bentonita (neste caso sódica natural) provocou praticamente a vedação do dano na geomembrana (Figura 8.7), sendo talvez esta a razão da redução brusca da vazão a 150 horas de ensaio.

A natureza da bentonita, portanto, parece ser importante para acelerar ou retardar o tempo necessário para reduzir o vazamento no caso de danos maiores na geomembrana que possam coincidir com caminhos preferenciais de fluxo. A maior capacidade de expansão de bentonitas sódicas pode inclusive contribuir para a selagem do dano mecânico na geomembrana. Entretanto, a influência da natureza da bentonita se limita ao estágio de fluxo transiente. No regime de fluxo permanente, ambos os GCLs apresentavam vazões de em torno de  $10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 8.6), valores similares àqueles observados nos demais ensaios executados (Figura 8.1 e Figura 8.2). Portanto, em termos de vazões finais, diferentes processos de fabricação e diferentes naturezas da bentonita compondo os GCLs não influenciaram o comportamento das barreiras compostas estudadas.



Figura 8.7 – Expansão da bentonita no GCL 1-S: amostra de GCL após o ensaio 1.S-10b - expansão da bentonita selando o furo da geomembrana no ensaio.

### 8.2.5 EVOLUÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS ENSAIADAS

Barroso et al. (2006) verificaram que a umidade não era homogênea ao longo dos corpos de prova de GCLs ensaiados, devido à concentração de tensões causada pela camada granular drenante sobre a geomembrana. Em áreas de concentração de tensões o contato da geomembrana com o GCL subjacente é mais íntimo, o que pode dificultar o escoamento da água de hidratação nessas regiões e/ou restringir a expansão da bentonita pela entrada de água entre as camadas dos argilominerais expansivos (menor “bulk void ratio” e conseqüentemente menor umidade gravimétrica). Da mesma forma, os maiores valores de umidade foram observados em áreas de não contato entre a camada granular e o GCL.

No presente trabalho, quando o cilindro superior era retirado da célula ao final dos ensaios, foram visualmente observadas regiões pouco hidratadas nos geotêxteis que compunham os GCLs do primeiro fabricante (a cor do geotêxtil que compunha os GCLs do segundo fabricante não permitia esta observação). Foram observadas também regiões não embebidas na superfície da geomembrana que estava em contato com o GCL, confirmando a existência de caminhos preferenciais de fluxo e indicando uma provável distribuição heterogênea do teor de umidade ao longo dos corpos de prova de GCL.

A evolução do teor de umidade dos corpos de prova dos GCLs foi verificada antes e depois dos ensaios, por meio de medidas de umidade de acordo com a norma ASTM D2216-05. A umidade inicial,  $w_i$ , era determinada a partir de uma amostra de aproximadamente 100 mm×100 mm, retirada nas proximidades do corpo de prova, assumindo-se que o teor de umidade determinado nessa amostra fosse igual ao teor de umidade inicial do corpo de prova usado no ensaio. No final de cada ensaio, era feita a verificação do teor de umidade final,  $w_f$ , nas 9 sub-amostras retiradas do corpo de prova com aproximadamente 47 mm×47 mm, conforme mostrado na Figura 8.8, visando verificar a distribuição do teor de umidade ao longo do corpo de prova (procedimento detalhado no item 7.2.2). O teor de umidade inicial do GCL ( $w_i$ ) assim como os teores de umidade finais ( $w_f$ ) de cada sub-amostra (numeradas de 1 a 9), estão apresentados na Tabela 8.1. Verifica-se uma distribuição heterogênea da umidade, o que pode ser atribuído à concentração de tensões da camada granular sobre a geomembrana (em acordo com as observações feitas por Barroso et al., 2006) e à variação da massa de bentonita ao longo da amostra de GCL, como pode ser verificado na Figura 8.4.



Figura 8.8 –Determinação da distribuição do teor de umidade final no corpo de prova ensaiado: (a) distribuição das sub-amostras no corpo de prova; (b) sub-amostras recortadas (amostra do ensaio 1.C-4).

Tabela 8.1 – Teor de umidade das amostras de GCL ensaiadas.

Ensaio	$w_i$ (%)	$w_f$ (%)									Média
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1.S-4	13,4	82,7	146,1	101,6	90,8	90,0	86,0	96,0	78,9	92,2	96,1
1.S-10	15,6	87,5	89,8	99,6	79,6	89,3	119,7	90,6	85,1	107,4	94,3
1.C-4	18,2	87,2	79,2	87,4	79,3	82,0	87,0	94,0	86,6	82,7	85,0
1.C-10	21,2	85,1	90,1	96,2	85,7	85,3	80,7	86,6	77,2	89,2	86,2
2.S-4	13,9	89,8	94,1	88,0	78,6	90,4	93,2	64,6	97,3	84,6	86,7
2.S-10	13,3	95,5	89,4	126,3	99,5	94,5	93,6	105,1	93,0	90,0	98,6
2.C-4	11,4	65,7	69,0	73,2	62,9	64,3	67,2	64,5	64,5	73,2	67,2

Nota: Valores de umidade determinados de acordo com ASTM D 2216-05;  $w_i$  = teor de umidade inicial (antes do ensaio);  $w_f$  = teor de umidade final (depois do ensaio).

### 8.3 INTERFACE DE CONTATO GM-GCL

#### 8.3.1 TRANSMISSIBILIDADE DA INTERFACE

Os valores de transmissibilidade da interface foram calculados por meio da solução analítica proposta por Touze-Foltz et al. (1999), previamente descrita no item 3.2.1, utilizando os

valores finais de vazão medidos nos ensaios de transmissibilidade executados (vazões correspondentes ao regime permanente de fluxo).

Deve-se destacar que a transmissibilidade calculada por meio da solução analítica proposta deve ser considerada como “transmissibilidade aparente”, uma vez que caminhos preferenciais de fluxo ocorreram nos ensaios, o que contraria uma das hipóteses consideradas nas equações (que assume que o fluxo através da interface é radial e homogêneo). A consideração da heterogeneidade da interface transmissível seria de difícil análise e até o momento não existem soluções analíticas que a considerem na relação entre vazão e transmissibilidade da interface nessas condições.

Em uma barreira composta, grande parte do líquido que passa pelo dano da geomembrana escoar lateralmente ao longo da interface GM-GCL até certa distância antes de infiltrar nas camadas subjacentes (GCL e CCL). O contorno desta região é denominado área molhada. No campo, um raio virtual  $R$ , a partir do dano da geomembrana, define a área molhada. Nas condições dos ensaios de laboratório executados no presente trabalho o raio da área molhada corresponde ao raio interno da célula. Para vazão não nula com carga hidráulica igual a zero em  $r = R_c$ , ilustrada na Figura 3.19b, utiliza-se a Equação 3.33 da solução analítica proposta por Touze-Foltz et al. (1999), para a determinação da transmissibilidade da interface GM-GCL, utilizando-se os valores de vazão determinados experimentalmente.

A Tabela 8.2 apresenta as condutividades hidráulicas dos materiais que compuseram a barreira composta, as vazões em regime de fluxo permanente determinadas experimentalmente na presente pesquisa e os valores de transmissibilidade da interface, assim como do raio virtual da área molhada calculados por meio das Equações 3.33 e 3.34, respectivamente, da solução analítica apresentada no item 3.2.1. Os valores de condutividade hidráulica equivalente da barreira passiva ( $k_{EQ}$ ) foram determinado por meio da Equação 8.1, baseada na continuidade do fluxo ao longo das camadas subjacentes à geomembrana.

$$k_{EQ} = \frac{H_{GCL} + H_{CCL} + H_{AL}}{\frac{H_{GCL}}{k_{GCL}} + \frac{H_{CCL}}{k_{CCL}} + \frac{H_{AL}}{k_{AL}}} \quad (8.1)$$

onde:  $H_{GCL}$  é a espessura do GCL;  $H_{CCL}$  é a espessura da camada de argila compactada;  $H_{AL}$  é a espessura da camada de atenuação (camada de solo abaixo do CCL);  $k_{GCL}$  é a condutividade

hidráulica do GCL;  $k_{CCL}$  é a condutividade hidráulica da camada de argila compactada e  $k_{AL}$  é a condutividade hidráulica da camada de atenuação.

Na configuração do ensaio de fluxo através da barreira composta, a barreira passiva era composta apenas do GCL + a camada de CCL, portanto o cálculo de  $k_{EQ}$  foi feito desconsiderando a parcela da camada de atenuação (AL).

Tabela 8.2 - Transmissibilidade de interface calculada a partir da solução analítica proposta por Touze-Foltz et al. (1999).

Ensaio	$k_{GCL}$ (m/s)	$k_{EQ}$ (GCL+BM) (m/s)	$Q$ medida (m <sup>3</sup> /s)	$\theta$ solução analítica (m <sup>2</sup> /s)	$R$ solução analítica (m)
1.S-4	$3,2 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-11}$	$1,3 \times 10^{-11}$	$2,6 \times 10^{-11}$	0,21
1.S-10			$1,3 \times 10^{-11}$	$1,9 \times 10^{-11}$	0,21
1.C-4	$6,9 \times 10^{-10}$	$9,4 \times 10^{-11}$	$1,4 \times 10^{-11}$	$2,8 \times 10^{-11}$	0,20
1.C-10			$1,8 \times 10^{-11}$	$2,7 \times 10^{-11}$	0,22
2.S-4	$1,6 \times 10^{-11}$	$5,5 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-11}$	$2,4 \times 10^{-11}$	0,23
2.S-10			$1,4 \times 10^{-11}$	$2,1 \times 10^{-11}$	0,24
2.C-4	$5,8 \times 10^{-8}$	$9,3 \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-11}$	$3,0 \times 10^{-11}$	0,20

Notas: Ensaio X.Y-Z: X corresponde ao tipo de fabricação do GCL (1 para GCL costurado e 2 para o GCL agulhado); Y corresponde à natureza da bentonita que compõe o GCL (S para bentonita sódica natural e C para bentonita cálcica natural) e Z é o diâmetro do dano (em milímetros) na geomembrana que compõe a barreira composta no ensaio de transmissibilidade;  $k_{GCL}$  = condutividade hidráulica do GCL;  $k_{EQ}$  = condutividade hidráulica equivalente da barreira passiva composta pelo GCL+CCL;  $Q$  = vazão através da barreira composta;  $\theta$ ,  $R$  = transmissibilidade da interface GM-GCL e raio da área molhada, respectivamente, calculados pela solução analítica.

Verifica-se (Tabela 8.2) que apesar da diferença de até 3 ordens de magnitude entre as condutividades hidráulicas dos GCLs estudados,  $k_{GCL}$ , as vazões medidas nos ensaios foram muito próximas, com a mesma ordem de grandeza e conseqüentemente os valores de transmissibilidade calculados também foram muito próximos. As transmissibilidades calculadas para os GCLs com bentonita cálcica (1.C e 2.C) foram ligeiramente maiores que as calculadas para bentonitas sódicas (1.S e 2.S). No entanto, essas diferenças se mostram irrelevantes quando comparadas à diferença das condutividades hidráulicas de cada GCL,  $k_{GCL}$ , como se observa na Tabela 8.2. Os valores de condutividade hidráulica equivalente da

barreira passiva,  $k_{EQ}$ , também tinham a mesma ordem de grandeza devido à pequena espessura dos GCLs (entre 7 e 11,7 mm) quando comparada à espessura da CCL (60 mm).

A troca de íons sódio para cálcio ocorre normalmente quando GCLs são usados em obras de aterros sanitários, visto que o cálcio é o cátion mais freqüente no chorume (Egloffstein, 2001). A troca de íons monovalentes de sódio por íons bivalentes de cálcio aumenta a atração entre os cristais, reduzindo os espaços entre as camadas de silicato e aumentando a atração intercristalina pelos íons bivalentes, como discutido no item 2.3.2 do Capítulo 2. Uma redução do volume e a mudança da micro-estrutura de pequenos flocos minerais para cristais maiores de minerais de argila aumenta a permeabilidade da bentonita (Figura 2.10). Os resultados da presente pesquisa sugerem que mesmo em caso de troca catiônica, transformando a bentonita sódica em cálcica, o GCL pode manter um bom desempenho dentro da barreira composta em termos de vazão de líquido e de transmissibilidade da interface GM-GCL. Portanto, avaliar o desempenho de uma barreira composta baseando-se apenas na condutividade hidráulica dos GCL pode ser errôneo.

### 8.3.2 CONDIÇÕES DE CONTATO NA INTERFACE

Brown et al. (1987) observou que em caso de dano na geomembrana de uma barreira composta, o vazamento de líquido depende necessariamente das condições de contato entre a geomembrana e o material subjacente. Rowe (1998) lista três das principais fontes de imperfeições na superfície de contato entre a geomembrana e o material subjacente. Uma das fontes de imperfeição é a existência de protuberâncias no material subjacente, criando um espaço vazio entre ele e a geomembrana. Os materiais granulares, mesmo que bem compactados, também podem apresentar estas protuberâncias devido à distribuição granulométrica que, por sua vez, influencia a condutividade hidráulica do solo. A segunda fonte de imperfeições é a inconformidade da superfície do solo, com ondulações, trilhas de roda, etc, como verificado por Cartaud et al. (2005). A terceira fonte de imperfeições na qualidade de contato é a presença de rugas na geomembrana, aumentando a espessura da interface transmissível (ao longo das rugas).

Como comentado no Capítulo 3, o vazamento através de um furo na geomembrana de uma barreira composta depende da transmissibilidade da interface de contato entre a geomembrana e o material subjacente que, por sua vez, depende da qualidade de contato entre as superfícies (Touze-Foltz & Giroud, 2003). Os valores de transmissibilidade da interface determinados

por meio da solução analítica na presente pesquisa, apresentados na Tabela 8.2, foram plotados em função da condutividade hidráulica do material subjacente à geomembrana (GCL+CCL) e são apresentados na Figura 8.9, onde também estão plotadas as retas das equações apresentadas na Tabela 3.2.. Essas retas correspondem à relação entre a transmissibilidade da interface e a condutividade hidráulica do material subjacente, para condições de contato ruim, boa, excelente e contato geomembrana e GCL (GM-GCL). Os valores de transmissibilidade da interface obtidos por Barroso et al. (2006; 2008; 2010) em ensaios variando a carga hidráulica, tipo de GCL, pré-hidratação e tensão confinante estão também plotados na Figura 8.9. Verifica-se que os valores de transmissibilidade da interface determinados a partir da solução analítica, para as configurações testadas na presente pesquisa, condizem com a condição de contato GM-GCL proposta por Touze-Foltz & Barroso (2006). Os valores determinados estão coerentes com aqueles obtidos por Barroso et al. (2006; 2008; 2010) no mesmo tipo de ensaio.

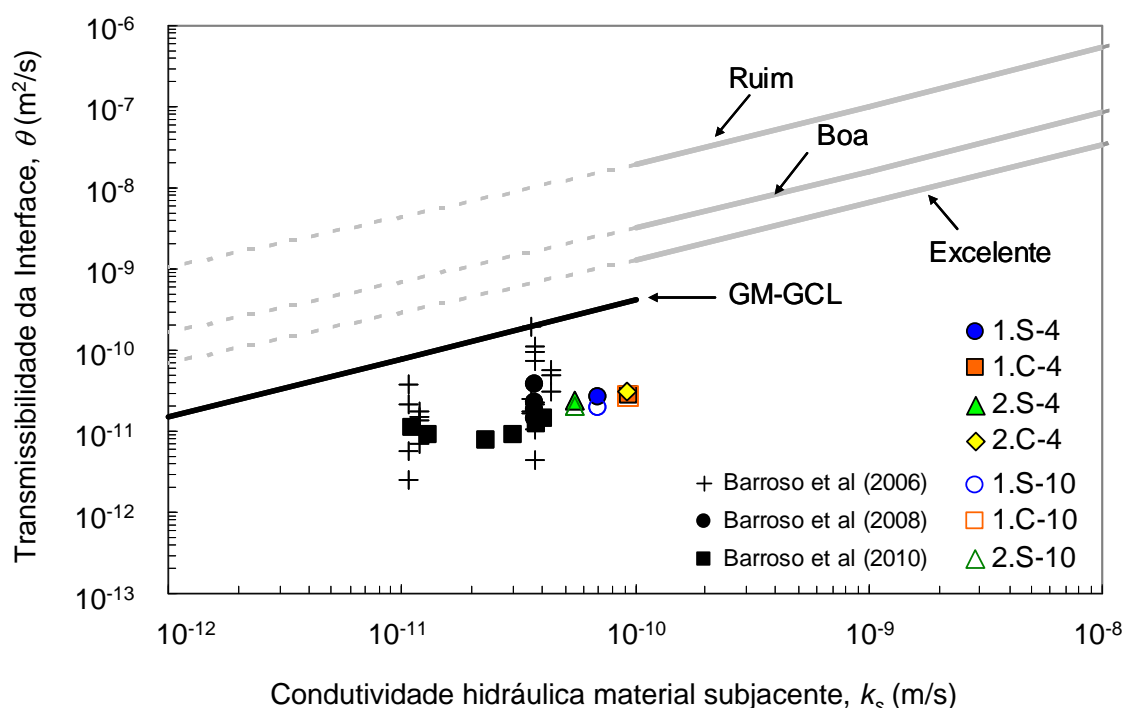


Figura 8.9 – Transmissibilidade da interface versus condutividade hidráulica do material subjacente.

As retas que traduzem a relação entre a transmissibilidade da interface e a condutividade hidráulica do material subjacente, mostradas na Figura 8.9, permitem visualizar a importância

da qualidade de contato no fluxo através dessa interface. O contato da geomembrana com um mesmo material subjacente, em termos de condutividade hidráulica, pode resultar em transmissibilidades de interface uma ordem de grandeza diferentes, dependendo da qualidade de contato entre a geomembrana e o material subjacente (vide as definições de cada condição de contato no item 3.2.2). Da mesma forma, duas interfaces podem ser igualmente transmissíveis mesmo que os solos da barreira passiva tenham condutividades hidráulicas bem diferentes. É justamente neste contexto que a utilização do GCL como componente da barreira passiva contribui reduzindo o fluxo através de barreiras compostas: ao mesmo tempo em que se melhora a condição de contato reduzindo a transmissibilidade da interface, o GCL ainda apresenta de baixa condutividade hidráulica para reduzir a infiltração do líquido através da barreira composta. No que concerne aos diferentes GCLs estudados na presente pesquisa, verifica-se que as barreiras compostas por GCL de bentonita sódica apresentam condutividade hidráulica equivalente ligeiramente menor que as compostas por GCL de bentonita cálcica, sem que isso influencie de forma significativa a transmissibilidade da interface (como anteriormente verificado na Tabela 8.2).

#### 8.4 REPERCUSSÕES NAS CONDIÇÕES DE CAMPO

O que se verificou no cálculo dos valores de transmissibilidade da interface GM-GCL foi a pouca influência do tipo de GCL (quanto à natureza da bentonita que o compõe e tipo de fabricação) na transmissibilidade quando o regime permanente de fluxo é atingido. Devido à pequena influência da condutividade hidráulica dos GCLs ( $k_{GCL}$ ) na condutividade hidráulica equivalente ( $k_{EQ}$ ) da barreira passiva, o estudo de laboratório ficou limitado à uma estreita variação de  $k_{EQ}$ . Esse fato despertou o interesse em analisar a influência da variação da condutividade hidráulica da camada de argila,  $k_{CCL}$ , no vazamento através da barreira composta sob condições de campo. O intuito foi aplicar a solução analítica para calcular a vazão,  $Q$ , e o raio da área molhada,  $R$ , em uma barreira composta com configurações de campo típicas, variando-se, além do GCL, a condutividade hidráulica da argila compactada e assumindo os valores de transmissibilidade da interface,  $\theta$ , obtidos nos ensaios (Tabela 8.2).

Para obter a vazão ( $Q$ ) nas condições de campo, a Equação 3.33 foi resolvida por tentativa e erro, assumindo-se inicialmente certo valor de raio da área molhada,  $R$ , na primeira tentativa. O valor correto de  $R$  é obtido de um processo iterativo, usando-se a Equação 3.28, com a carga hidráulica na distância  $R$  do furo na geomembrana,  $h(R)$ , igual a zero.



Para a previsão de  $Q$  e  $R$  em condições de campo, foram feitas 16 simulações considerando a configuração típica do fundo de aterros sanitários na França (Guyonnet et al., 2007; Touze-Foltz et al., 2008; MEEDDAT, 2009) que consiste nas seguintes camadas (do topo para a base): GM, GCL, camada de argila compactada (CCL) com 0,5 m de espessura e camada de atenuação (AL) com 5 m de espessura, como apresentado na Figura 2.7(c). As 16 simulações foram divididas em 4 grupos, A, B, C e D, de acordo com o valor considerado para  $k_{CCL}$ :  $8 \times 10^{-11}$  m/s (mesma condutividade hidráulica do solo usado nos ensaios),  $1 \times 10^{-10}$  m/s,  $1 \times 10^{-9}$  m/s, e  $1 \times 10^{-8}$  m/s, respectivamente. Em cada grupo foram feitas simulações com cada um dos 4 GCLs estudados: 1.S, 1.C, 2.S e 2.C, adotando-se os valores da espessura ( $H_{GCL}$ ) e da condutividade hidráulica ( $k_{GCL}$ ) apresentados na Tabela 4.1 bem como os valores de transmissibilidade ( $\theta$ ) determinados por meio da solução analítica com base nos resultados de ensaios (ver Tabela 8.2). Em todas as 16 simulações, a condutividade hidráulica da camada de atenuação foi considerada a mesma  $k_{AL} = 1 \times 10^{-6}$  m/s.

No cálculo de  $Q$ , a condutividade hidráulica  $k_s$  da Equação 3.45 deve ser substituída pela condutividade hidráulica equivalente,  $k_{EQ}$ , calculada pela Equação 8.1 a partir das espessuras e condutividades hidráulicas das camadas que compõem a barreira passiva: GCL, CCL e camada de atenuação. A Tabela 8.3 apresenta os valores de espessura e condutividade hidráulica das camadas de GCL, CCL e AL para cada simulação bem como os valores de condutividade hidráulica equivalente,  $k_{EQ}$ , determinados para cada caso.

No total, 16 valores de  $k_{EQ}$ , variando de  $8.2 \times 10^{-10}$  a  $1.0 \times 10^{-7}$  m/s (Tabela 8.3), foram usados nos cálculos, resultado da combinação de 4 diferentes  $k_{CCL}$  e mais 4 diferentes  $k_{GCL}$ . Para manter a coerência com os valores de transmissibilidade determinados no programa experimental, a previsão da vazão  $Q$  e do raio da área molhada  $R$  para condições de campo foram feitos considerando as mesmas solicitações dos ensaios, i.e., 50 kPa de pressão normal sobre a geomembrana, 30 cm de carga hidráulica e dano mecânico de 4 mm de diâmetro na geomembrana.

Tabela 8.3 – Parâmetros usados no cálculo de  $Q$  e  $R$  nas dimensões de campo.

Dados do GCL			Camada de argila compactada		Camada de atenuação		$k_{EQ}$	Grupo
Cod.	$k_{GCL}$ (m/s)	$H_{GCL}$ (mm)	$k_{CCL}$ (m/s)	$H_{CCL}$ (m)	$k_{AL}$ (m/s)	$H_{AL}$ (m)	(m/s)	
1.S	$3,2 \times 10^{-11}$	7,0	$8 \times 10^{-11}$	0,5	$1 \times 10^{-6}$	5	$8,5 \times 10^{-10}$	A
1.C	$6,9 \times 10^{-10}$	11,7					$8,8 \times 10^{-10}$	
2.S	$1,6 \times 10^{-11}$	7,7					$8,2 \times 10^{-10}$	
2.C	$5,8 \times 10^{-08}$	8,4					$8,8 \times 10^{-10}$	
1.S	$3,2 \times 10^{-11}$	7,0	$1 \times 10^{-10}$	0,5	$1 \times 10^{-6}$	5	$1,1 \times 10^{-9}$	B
1.C	$6,9 \times 10^{-10}$	11,7					$1,1 \times 10^{-9}$	
2.S	$1,6 \times 10^{-11}$	7,7					$1,0 \times 10^{-9}$	
2.C	$5,8 \times 10^{-08}$	8,4					$1,1 \times 10^{-9}$	
1.S	$3,2 \times 10^{-11}$	7,0	$1 \times 10^{-9}$	0,5	$1 \times 10^{-6}$	5	$7,6 \times 10^{-9}$	C
1.C	$6,9 \times 10^{-10}$	11,7					$1,1 \times 10^{-8}$	
2.S	$1,6 \times 10^{-11}$	7,7					$5,6 \times 10^{-9}$	
2.C	$5,8 \times 10^{-08}$	8,4					$1,1 \times 10^{-8}$	
1.S	$3,2 \times 10^{-11}$	7,0	$1 \times 10^{-8}$	0,5	$1 \times 10^{-6}$	5	$2,0 \times 10^{-8}$	D
1.C	$6,9 \times 10^{-10}$	11,7					$7,7 \times 10^{-8}$	
2.S	$1,6 \times 10^{-11}$	7,7					$1,0 \times 10^{-8}$	
2.C	$5,8 \times 10^{-08}$	8,4					$1,0 \times 10^{-7}$	

Notas:  $k_{GCL}$  = condutividade hidráulica do GCL;  $H_{GCL}$  = espessura do GCL;  $k_{CCL}$  = condutividade hidráulica do CCL;  $H_{CCL}$  = espessura do CCL no campo;  $H_{AL}$  = espessura da camada de atenuação;  $k_{AL}$  = condutividade hidráulica da camada de atenuação;  $k_{EQ}$  = condutividade hidráulica equivalente da barreira passiva.

A Figura 8.10 apresenta a vazão calculada através do dano na geomembrana ( $Q$ ) versus a condutividade hidráulica equivalente ( $k_{EQ}$ ) da barreira passiva. Os valores de vazão calculados variam entre  $1,4 \times 10^{-11}$  m/s e  $4,4 \times 10^{-11}$  m/s, mostrando pouca influência da condutividade hidráulica na vazão resultante. As vazões obtidas quando GCLs de bentonita sódica (1.S e 2.S) foram usados, foram ligeiramente menores que as obtidas quando GCLs com bentonita cálcica (1.C e 2.C) foram usados, especialmente para os maiores valores de  $k_{EQ}$ . As maiores variações de  $Q$  com  $k_{EQ}$  foram observadas nas simulações que consideraram os maiores valores de  $k_{CCL}$  (grupos C e D).

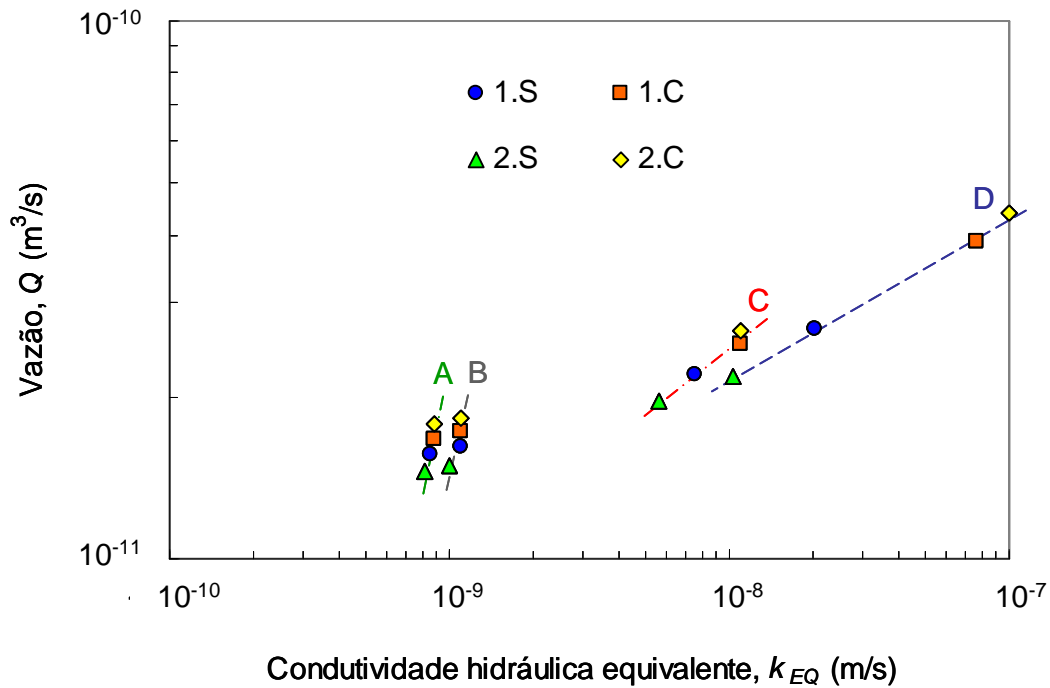


Figura 8.10 – Vazão versus condutividade hidráulica equivalente nas condições de campo.

A Figura 8.11 mostra a variação do raio estimado da área molhada,  $R$ , versus a condutividade hidráulica equivalente da barreira passiva,  $k_{EQ}$ . Verificou-se pouca variação de  $R$  para os menores valores de  $k_{EQ}$ . Uma tendência de redução de  $R$  com  $k_{EQ}$  foi observada para maiores valores de  $k_{EQ}$  (novamente nas configurações C e D). O raio da área molhada decresce nestes casos porque quanto maior a facilidade de infiltração da água através da barreira passiva, menor a distância que ela alcançará ao longo da interface GM-GCL antes de infiltrar nas camadas subjacentes. Os resultados apresentados nas Figuras 8.10 e 8.11 indicam que um maior raio da área molhada não significa necessariamente maior vazamento. Uma menor área molhada na interface GM-GCL pode significar que o líquido encontrou facilidade em infiltrar através da barreira composta, ao invés de escoar lateralmente pela interface de contato. Os resultados sugerem que a influência do tipo de GCL usado na barreira é mais relevante para maiores valores de  $k_{CCL}$ .

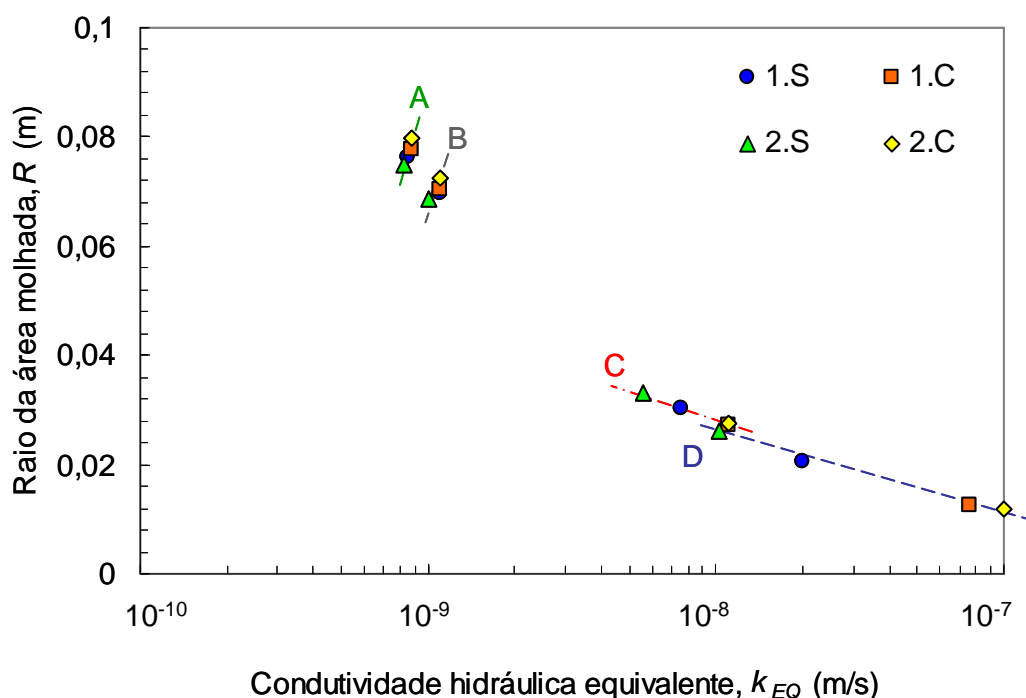


Figura 8.11 – Raio da área molhada versus Condutividade hidráulica equivalente nas condições de campo.

## 8.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A natureza da bentonita que compõe um GCL é importante para sua condutividade hidráulica. Este fato despertou o interesse em verificar se ela pode também influenciar o fluxo através de uma barreira composta e os valores de transmissibilidade na interface entre a geomembrana e o GCL. Nos ensaios de fluxo executados na presente pesquisa, os valores obtidos de vazão sob regime permanente de fluxo foram praticamente idênticos independentemente da natureza da bentonita ou do processo de fabricação do GCL. Conseqüentemente, os valores de transmissibilidade de interface, calculados usando a vazão em regime permanente de fluxo, não variaram significativamente.

Os GCLs costurados podem favorecer a formação de caminhos preferenciais de fluxo na interface GM-GCL, particularmente quando o dano na geomembrana coincide com a direção de uma das costuras, o que pode levar a maiores valores de fluxo no regime transiente e maior tempo necessário para atingir o regime permanente de fluxo.

A dimensão do dano mecânico na geomembrana não parece influenciar as vazões através da barreira composta, considerando o intervalo de dimensões estudadas, a não ser pelo aumento

da possibilidade de sobreposição do dano com um caminho preferencial, tal como uma costura.

Após os ensaios de fluxo através de barreiras compostas, foi verificado que o formato da área molhada na interface GM-GCL não era uniforme nem axi-simétrico, como supõe a solução analítica usada no cálculo da transmissibilidade. Isto é devido a uma combinação de fatores, como a distribuição não uniforme da bentonita dentro do GCL, concentração de tensões em algumas áreas devido à protuberâncias da camada drenante sobrejacente à geomembrana e caminhos preferenciais de fluxo na interface. Como consequência, a distribuição do teor de umidade final do GCL também não foi uniforme.

A solução analítica proposta por Touze-Foltz et al. (1999) foi empregada para estimar os valores de transmissibilidade da interface GM-GCL usando os valores de vazão obtidos dos ensaios de laboratório. Não foram verificadas diferenças significativas dos valores de transmissibilidade para ensaios feitos com GCLs diferentes, apesar da diferença de três ordens de magnitude nos valores de condutividade hidráulica dos mesmos. Estes resultados indicam que em caso de troca catiônica (transformando a bentonita sódica em bentonita cálcica), o desempenho do GCL na barreira contra fluxo de líquidos não sofrerá grandes prejuízos.

Os valores de transmissibilidade da interface determinados pela solução analítica foram plotados em função da condutividade hidráulica da camada subjacente à geomembrana e se mostraram condizentes com a condição de contato GM-GCL de equações empíricas definidas por Touze-Foltz & Barroso (2006).

A solução analítica também foi usada na previsão das vazões através de barreiras compostas com configurações típicas nos aterros sanitários da França (MEEDDAT, 2009), variando-se o GCL da barreira passiva e a condutividade hidráulica da camada de argila compactada (CCL). Verificou-se pouca influência da condutividade hidráulica equivalente,  $k_{EQ}$ , nas vazões previstas, mas uma tendência de aumento da vazão com a condutividade hidráulica equivalente foi observada para as maiores  $k_{EQ}$ . A respeito do raio da área molhada,  $R$ , uma tendência contrária foi observada: quanto maior a condutividade hidráulica equivalente menor o raio da área molhada. Devido à maior facilidade de infiltração da água através da barreira passiva para os maiores valores de condutividade hidráulica, menor a distância que a água alcança ao longo da interface GM-GCL, antes de infiltrar através da barreira passiva.

### 8 RESULTATS DE L'ETUDE DU TRANSFERT DE LIQUIDE AU TRAVERS DES ETANCHEITES COMPOSITES

#### Résumé

Dans l'étude de transfert de liquide au travers des étanchéités composites, quatre types de GCL venus de deux fabricants différents, composés de bentonite sodique ou calcique ont été testés : 1.S, 1.C, 2.S et 2.C. La géomembrane en contact supérieur avec le GCL présentait un poinçonnement de 4 ou 10 mm de diamètre. Les essais réalisés ont montré pratiquement le même débit de fuite pour toutes les configurations testées (paragraphe 8.2). Malgré la différence de conductivité hydraulique de trois ordres de grandeur suivant les GCL, les valeurs de débit de fuite en régime permanent étaient tous d'environ  $10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Les GCLs cousus du premier fabricant peuvent entraîner la formation de chemins préférentiels dans l'interface GM-GCL, particulièrement quand l'endommagement de la geomembrane coïncide avec la direction de la couture du GCL ce qui augmente le flux en régime transitoire. Après les essais, on a vérifié sur le GCL que la forme de la superficie mouillée sous le défaut n'était pas axi-symétrique, ni uniforme, comme le suppose la solution analytique. Cela est dû à la combinaison de l'action de plusieurs facteurs tels que: la distribution non homogène de la bentonite pendant la fabrication du GCL ; la concentration de pression en certains points due à la couche granulaire sur la GM et les chemins préférentiels au travers de l'interface GM-GCL.

Les valeurs de débit de fuite obtenues à partir des essais de flux au travers des étanchéités composites ont été utilisées pour le calcul de la transmissivité de l'interface GM-GCL par la solution analytique (paragraphe 8.3). Dans cette étude, on considère la « transmissivité apparente » qui correspond à la valeur de transmissivité calculé par la solution analytique même si certaines conditions admises par la solution analytique n'étaient pas vérifiées dans les essais au laboratoire. Comme les valeurs de débit de fuite, celles de la transmissivité de l'interface n'ont pas été affectées par le type de GCL de l'étanchéité composite. La relation entre la transmissivité de l'interface,  $\theta$ , et la conductivité hydraulique de la barrière passive

(GCL+CCL),  $k_s$ , indique que la condition de contact GM-GCL des essais dans cette étude est comparable à celles d'études précédentes.

Pour vérifier la répercussion des valeurs de transmissibilité calculées dans les conditions réelles des ISD, une étude a été menée dans l'objectif de déterminer le débit de fuite,  $Q$ , et le rayon de la superficie mouillée,  $R$ , pour 12 configurations différentes en modifiant le type de GCL et la conductivité hydraulique de la CCL (paragraphe 8.4). Bien que la conductivité hydraulique équivalente de la barrière passive varie de plus de deux ordres de grandeur, les valeurs de  $Q$  restent très proches pour toutes les configurations testées ainsi que les valeurs de  $R$ . Une seule tendance avec une augmentation de  $Q$  et une réduction de  $R$  est observée quand le CCL est plus perméable (groupes de configuration C et D qui correspondent à  $k_{CCL}$  égal à  $1 \times 10^{-9}$  et  $1 \times 10^{-8}$  m/s respectivement).

Les résultats de cette étude indiquent que l'influence de la bentonite du GCL dans le flux au travers des étanchéités composites est secondaire par rapport à d'autres influences. Le type de fabrication du GCL, par exemple, semble être plus influent vu que le liquide peut trouver un chemin préférentiel au travers l'interface ce qui peut augmenter l'écoulement en régime transitoire et retarder l'apparition du régime permanent.

### 9 CONCLUSÕES E SUGESÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

#### 9.1 CONCLUSÕES

A investigação da influência da bentonita no fluxo de gases e líquidos através de barreiras geossintéticas foi o principal objeto de estudo dessa tese. Estudou-se também a influência de outros fatores como o processo de fabricação do GCL, geotêxteis de suporte e cobertura, teor de umidade, entre outros. Foram feitos dois estudos específicos com o intuito de investigar a eficiência dos GCLs na cobertura de aterros sanitários (Parte II da tese, onde se apresentou o estudo da permeabilidade ao gás de GCLs) e também no fundo de aterros sanitários (Parte III da tese, onde se apresentou o estudo do vazamento de líquidos através de barreira composta GM-GCL-CCL devido a um dano na geomembrana). Os resultados desses dois estudos mostram que, de forma geral, o desempenho dos GCLs ensaiados não foi influenciado de forma significativa pela natureza da bentonita constituinte. Outras características foram mais relevantes nas propriedades dos GCLs estudados. No caso dos GCLs testados como barreira de gases, o ressecamento da bentonita causado pelo fluxo de gases foi mais influente do que a natureza da bentonita. No caso das barreiras compostas GM-GCL-CCL testadas como barreira de líquidos, os caminhos preferenciais de fluxo na interface GM-GCL foram mais relevantes na vazão através da barreira. As conclusões específicas de cada estudo conduzido estão sumariadas a seguir.

##### 9.1.1 PERMEABILIDADE AO GÁS DE GCLS

Os equipamentos tradicionalmente usados para o estudo da permeabilidade ao gás de GCLs fazem medidas da vazão de gás que atravessa o corpo de prova quando certo gradiente de pressão é aplicado. Para que essa vazão seja mensurável, a maioria dos ensaios é conduzida com aplicação de diferenciais de pressão altos, o que pode levar à dessecação das amostras, ou seja, modificação do seu estado de hidratação. Na presente pesquisa, ensaios de permeabilidade ao gás foram conduzidos em um equipamento desenvolvido recentemente, que utiliza o método da queda de pressão para o cálculo da permeabilidade ao gás dos GCLs.



Esse equipamento, denominado permeâmetro de fluxo transiente (Pitanga, 2007), aproxima as condições dos ensaios de laboratório às condições de campo, onde o diferencial de pressões totais raramente ultrapassa os 10 kPa (considerando um aterro sanitário com as devidas instalações de drenagem e coleta do gás produzido no interior das células). Com o permeâmetro de fluxo transiente é feita a medida da queda de pressão dentro de uma câmara fechada pelo corpo de prova e, por meio de soluções analíticas, a relação do diferencial de pressão com o tempo pode ser relacionada à permeabilidade ao gás do corpo de prova.

Em estudo para a verificação da repetibilidade dos resultados para diferentes níveis de pressões totais aplicadas, verificou-se boa repetibilidade para pressões diferenciais de até 40 kPa. Diferenciais de pressão maiores que esse valor provocaram a dessecação do corpo de prova e conseqüente aumento da permeabilidade medida por meio dos ensaios. Baseando nesses resultados e nas condições típicas dos aterros sanitários, adotou-se para os demais ensaios um limite de pressão diferencial de 10 kPa, visando aproximar as condições do ensaio às condições do campo.

Os três GCLs investigados, 1.S, 1.C e 1.CA, eram do mesmo fabricante, diferindo apenas pela natureza da bentonita: sódica natural, cálcica natural e cálcica ativada, respectivamente. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram reduções da permeabilidade ao gás (aumento da constante de tempo,  $\tau$ ) com o aumento do teor de umidade gravimétrico,  $w$ . GCLs à base de bentonita sódica natural e cálcica ativada demandam teores de umidade gravimétricos maiores do que os compostos por bentonita cálcica natural para atingir um mesmo valor de  $\tau$ . A relação da constante de tempo,  $\tau$ , com o teor de umidade volumétrico,  $v$ , foi praticamente independente do tipo de bentonita dos GCLs. Esse resultado demonstra que a eficiência de certo nível de hidratação de um GCL não deve ser verificada por meio de relações de massa (teor de umidade gravimétrico,  $w$ ) e sim por meio de relações de volume, (teor de umidade gravimétrico,  $v$ ), visto que a estrutura da bentonita influencia definitivamente o desempenho do GCL. A quantidade de ar,  $a$ , se mostrou igualmente importante na permeabilidade ao gás de GCLs. A permeabilidade dos GCLs aumenta com a quantidade de ar embutida no meio poroso. No entanto, um mesmo valor de  $a$  em dois GCLs diferentes pode resultar em valores de  $\tau$  uma ordem de grandeza diferentes. Esse resultado demonstra que não somente a quantidade de ar,  $a$ , mas também a sua distribuição, especialmente no que diz respeito à interconexão entre os vazios remanescente, são fatores importantes. O que se verifica, portanto é que mais importante do que a natureza da bentonita que compõe os GCLs, o

dessecamento da mesma é o fator de maior relevância no desempenho dos GCLs como barreira de gases. A perda de umidade da bentonita pode ser agravada pelo fluxo de gases através dos GCL. Esses resultados reforçam a importância da proteção dos GCLs instalados na cobertura de aterros sanitários, já comentada por outros autores.

### **9.1.2 TRANSPORTE DE LÍQUIDOS ATRAVÉS DE BARREIRAS COMPOSTAS**

No estudo do transporte de líquidos através de barreiras compostas verificou-se que, apesar da natureza da bentonita ser importante para a condutividade hidráulica do GCL, o fluxo através de uma barreira composta GM-GCL-CCL devido a um dano na geomembrana não foi influenciado pelo tipo de bentonita do GCL. Os GCLs selecionados para o estudo, 1.S, 1.C, 2.S e 2.C, diferiam pela natureza da bentonita, geotêxteis de suporte e cobertura e também pelo processo de fabricação. Para os quatro GCLs usados, o fluxo através da barreira composta foi praticamente idêntico (em torno de  $10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s). Os valores de transmissibilidade da interface GM-GCL determinados por meio de solução analítica, por consequência, também foram praticamente os mesmos. Os GCLs costurados podem favorecer a formação de caminhos preferenciais de fluxo ao longo da interface de contato GM-GCL, especialmente quando o dano mecânico na geomembrana coincide com a direção de uma costura do GCL. Esses caminhos preferenciais, apesar de não terem afetado os valores de vazão em regime permanente de fluxo, foram as prováveis causas das diferenças na cinética das vazões em regime de fluxo transiente.

Os ensaios permitiram a verificação da influência da dimensão do dano da GM no fluxo através da barreira. Foram feitos ensaios com danos mecânicos circulares de 4 ou 10 mm de diâmetro. Verificou-se que o diâmetro do dano também não influenciou a vazão através da barreira depois de atingido o regime de fluxo permanente. No entanto, é importante ponderar que nos casos com diâmetro maior na geomembrana, é maior a probabilidade de o dano encontrar a direção de uma costura no caso dos GCLs costurados, formando um caminho preferencial de fluxo através da interface GM-GCL. Essa pode ter sido a causa das maiores vazões observadas durante o regime de fluxo transiente em alguns ensaios com dano de 10 mm.

Ao os ensaios, verificou-se que o formato da área molhada na superfície do GCL em contato com a geomembrana não era uniforme nem axi-simétrico, contrariando o que as soluções analíticas (Touze-Foltz et al., 1999) assumem para a determinação da transmissibilidade da

interface GM-GCL. Isso foi atribuído a uma combinação de fatores como a distribuição não uniforme da bentonita durante a fabricação do GCL, a concentração de tensões devido a protuberâncias da camada drenante sobreposta à geomembrana e aos caminhos preferenciais ao longo das costuras do GCL. Conseqüentemente, a distribuição do teor de umidade ao longo dos corpos de prova de GCL não foi homogênea.

Os valores de transmissibilidade da interface foram determinados por meio de soluções analíticas utilizando os resultados dos ensaios de laboratório como dados de entrada. Essas mesmas soluções analíticas foram novamente utilizadas para a estimativa da vazão,  $Q$ , através de barreiras compostas e do raio da área molhada,  $R$ , nas configurações típicas de aterros sanitários na França. Foram utilizados os valores de transmissibilidade da interface GM-GCL determinados anteriormente. Verificou-se pouca variação de  $Q$  e  $R$  com a condutividade hidráulica equivalente da barreira passiva,  $k_{EQ}$ . Apenas para maiores valores de  $k_{EQ}$  é que se verificou uma tímida tendência de aumento da vazão,  $Q$ , e redução da área molhada,  $R$ , ou seja, quanto maior a facilidade de infiltração da água na barreira passiva, menor a distância alcançada pela água na interface com a geomembrana.

### 9.1.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Os estudos conduzidos na presente pesquisa indicam pouca influência da natureza da bentonita no desempenho dos GCLs para condições investigadas. Independente disso, fica constatado a eficiência dos GCLs como barreira gases e líquidos. Os valores de permeabilidade intrínseca calculados por meio dos ensaios no permeâmetro de fluxo transiente eram da ordem de  $10^{-15}$  m<sup>2</sup> em corpos de prova de GCL sem fissuras. Quanto ao vazamento de líquido através de barreiras compostas GM-GCL-CCL devido a um dano na GM, foram medidas vazões da ordem de  $10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s nos casos estudados.

Fatores como os caminhos preferenciais de fluxo e fissuras na bentonita devido à perda de umidade se mostraram mais influentes na eficiência dos GCLs. As sugestões a seguir lançam direções para novas pesquisas a serem conduzidas no sentido de esclarecer os pontos que fogem do escopo dessa tese.

## 9.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A determinação do índice de vazios entre camadas e índice de vazios entre partículas de bentonita parece ser uma questão chave no entendimento do comportamento de bentonitas de naturezas diferentes. A maior expansão das bentonitas sódicas naturais é devida à maior entrada de água entre as camadas de silicato da argila. No entanto, em termos de comportamento da bentonita, os vazios entre camadas deveriam ser distinguidos dos vazios entre partículas. Pesquisas anteriores indicam que o comportamento de materiais expansivos é governado pelos vazios entre as partículas, o que explicaria a necessidade de maior hidratação de bentonitas sódicas em relação às bentonitas cálcicas para atingir o mesmo valor de permeabilidade ao gás. Na literatura ainda não são disponibilizados trabalhos que diferenciem quantitativamente os vazios entre camadas de silicato e entre partículas de argila, embora uma análise qualitativa tenha sido apresentada por Camapum de Carvalho (2007) e Campos et al. (2008).

O ressecamento da bentonita no interior do GCL se mostrou influente na permeabilidade ao gás desses materiais. Seria interessante, portanto, executar ensaios de permeabilidade em ciclos de secagem e re-hidratação para verificar a capacidade de auto cicatrização das fissuras por dessecação e, principalmente, o limite de perda de umidade em que a auto cicatrização deixa de acontecer.

A troca de cátions monovalentes por cátions bivalentes da bentonita é inevitável em longo prazo. Seria interessante, portanto, avaliar a evolução do fluxo através de barreiras compostas por meio de ensaios de longa duração. Ensaios desse tipo poderiam demonstrar se a troca de cátions da bentonita no interior do GCL poderia contribuir para um aumento do fluxo de líquido passando pelo dano na geomembrana da barreira composta.

### 9 CONCLUSIONS ET SUGGESTIONS POUR DES RECHERCHES FUTURES

#### 9.1 CONCLUSIONS

L'étude de l'influence de la nature de la bentonite du GCL sur le flux de gaz et de liquide au travers des barrières géosynthétiques dans les conditions réelles de la couverture et du fond des ISD était l'objectif de cette thèse. L'étude comprend aussi l'influence d'autres caractéristiques des GCL, comme le procédé de fabrication, les geotextiles de support et de couverture, la teneur en eau, entre autres. De manière générale, la performance des GCLs testés n'a pas été influencée significativement par la nature de la bentonite. Dans les essais de flux de gaz, le dessèchement de la bentonite causé par le flux de gaz a influencé plus significativement la performance du GCL que la nature de la bentonite. Dans les essais d'écoulement de liquide au travers des étanchéités composites GM-GCL-CCL, les chemins préférentiels de flux dans l'interface GM-GCL ont affecté l'écoulement plus significativement que la nature de la bentonite. Les conclusions de chaque étude sont décrites dans les paragraphes 9.1.1 et 9.1.2.

##### 9.1.1 PERMEABILITE AU GAZ DES GCLS

Les équipements traditionnellement utilisés pour l'étude de la perméabilité aux gaz des GCLs mesurent le débit de fuite qui traverse l'échantillon quand celui-ci est soumis à un certain gradient de pression. Pour que le débit soit mesurable, la plupart des équipements imposent une différence de pression relativement élevée (40 kPa par exemple), ce qui peut conduire au dessèchement de l'échantillon, donc à une modification de son niveau d'hydratation. Dans cette recherche, les essais de perméabilité au gaz des GCL sont été effectués avec un équipement proposé récemment par Pitanga (2007), qui utilise la méthode de la chute de pression pour la détermination de la perméabilité au gaz des GCLs. Le principe de cette méthode consiste à mesurer la chute de pression dans une chambre couverte par l'échantillon de GCL. Des solutions analytiques font la relation entre la cinétique de la différence de pression dans la chambre et la perméabilité au gaz de l'échantillon. Cette méthode n'exige pas

l'application de grands gradients de pression pour la mesure de la chute de pression, ce qui permet de travailler dans les conditions réelles du site, où on ne trouve pas souvent des gradients de pression supérieurs à 10 kPa.

Les essais réalisés avec cet équipement ont montré une bonne répétitivité des résultats pour des gradients de pression inférieurs à 40 kPa. Les gradients de pression supérieurs ont provoqué la dessiccation de l'échantillon. C'est pourquoi la pression maximale de 10 kPa a été adoptée pour l'étude de la perméabilité aux gaz des GCLs dans cette recherche.

Les trois GCLs testés viennent du même fabricant et diffèrent par le type de bentonite : sodique naturelle, calcique naturelle et calcique activé. Les résultats obtenus montrent des réductions de la perméabilité au gaz (augmentation de la constante de temps,  $\tau$ ) avec l'augmentation de la teneur en eau gravimétrique,  $w$ . Pour atteindre la même valeur de  $\tau$ , les GCLs à base de bentonite sodique naturelle ou calcique activée nécessitent des teneurs en eau gravimétriques supérieures à celles des GCLs à base de bentonite calcique naturelle. En terme de teneur en eau volumique, la relation  $\tau$  versus  $\vartheta$  est pratiquement indépendante du type de GCL. Ce résultat indique que la teneur en eau de la bentonite dans un GCL doit être associée à sa structure pour qu'on puisse évaluer le niveau d'hydratation des bentonites de natures différentes. La quantité volumique d'air,  $a$ , dans la bentonite s'est également avérée comme un paramètre important vis-à-vis de la perméabilité au gaz des GCLs ; la perméabilité au gaz augmente avec la quantité d'air de la structure poreuse. Cependant, une même valeur de  $a$  pour deux échantillons conduit à des valeurs de  $\tau$  différentes d'un ordre de grandeur. Ce résultat indique qu'outre la quantité d'air, le degré d'interconnexion entre les pores est aussi important vis-à-vis de la perméabilité au gaz du GCL. On observe donc que le dessèchement de la bentonite est un facteur plus décisif vis-à-vis de la performance du GCL en tant que barrière de gaz que la nature de la bentonite. La réduction de la teneur en eau peut aussi être aggravée par le flux de gaz au travers du GCL, ce qui est démontré l'importance de la protection des GCL installés en couverture des ISD.

### **9.1.2 TRANSFERT DE LIQUIDE AU TRAVERS DES ETANCHEITES COMPOSITES**

Dans l'étude du transfert de liquide au travers des étanchéités composites, on a vérifié que, bien que la nature de la bentonite soit déterminante pour la conductivité hydraulique du GCL, l'écoulement au travers des étanchéités composites GM-GCL-CCL dû à un endommagement

de la geomembrane n'est pas affecté par le type de bentonite du GCL. Les débits de fuite au travers des étanchéités composites observés en laboratoire étaient pratiquement identiques, soit environ  $10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$ , pour tous les GCLs testés. Les valeurs de transmissivité d'interface déterminés par les solutions analytiques ont donc été pratiquement les mêmes pour tous les GCLs testés. Les quatre GCLs sélectionnés pour l'étude, viennent de deux fabricants et diffèrent par le type de bentonite (sodique naturel ou calcique naturel), les géotextiles de support et de couverture et le procédé de fabrication. Les résultats des essais de flux au travers des étanchéités composites GM-GCL-CCL montrent que les GCLs cousus peuvent conduire à la formation de chemins préférentiels le long de la direction d'une couture, notamment si l'endommagement de la geomembrane coïncide avec la direction d'une couture. Ces chemins préférentiels peuvent augmenter l'écoulement en régime transitoire et retarder l'apparition du régime permanent de flux.

Le diamètre de l'endommagement mécanique sur la géomembrane (4 ou 10 mm de diamètre) n'a pas affecté l'écoulement au travers de l'étanchéité composite. Cependant, pour les endommagements de 10 mm, la possibilité de coïncidence de l'endommagement avec la direction d'une couture du GCL augmente.

Après les essais, on a vérifié que la forme de la superficie mouillée du GCL en contact avec la GM n'était pas uniforme ni axisymétrique, comme le suppose les solutions analytiques (Touze-Foltz et al., 1999) pour le calcul de la transmissivité d'interface GM-GCL. Ce résultat a été attribué à une combinaison de facteurs tels que la distribution non uniforme de la bentonite pendant la fabrication du GCL, la concentration de contrainte mécanique due à la couche granulaire sur la géomembrane et les chemins préférentiels le long des coutures. En conséquence, la distribution de la teneur en eau de l'échantillon de GCL n'était pas homogène à la fin des essais.

Les valeurs de transmissivité de l'interface sont été calculées par solutions analytiques en utilisant les résultats des essais de laboratoire. Ces mêmes solutions analytiques ont été encore utilisées dans l'estimation du débit de fuite,  $Q$ , et du rayon de superficie mouillée,  $R$ , au travers des étanchéités composites dans les configurations typiques des ISD en France. Les données d'entrée dans ce cas étaient les valeurs de transmissivité d'interface GM-GCL déterminées précédemment. La variation des valeurs de  $Q$  et  $R$  n'a pas été significative par rapport à la variation de la conductivité équivalente de la barrière passive  $k_{EQ}$ . Une petite augmentation de  $Q$  avec une réduction de  $R$  ont été observées pour des valeurs supérieures de

$k_{EQ}$ . Donc, plus l'infiltration d'eau vers la barrière passive est facilitée (plus grande valeur de  $k_{EQ}$ ), et plus faible est la distance atteinte par l'eau dans l'interface GM-GCL.

### 9.1.3 COMMENTAIRES FINALES

Les études menées dans cette thèse indiquent une faible influence de la nature de la bentonite dans la performance des GCLs pour les conditions étudiées. Indépendant de la différence entre les matériaux testés, on constate l'efficacité des GCLs comme barrières de gaz et liquides. Les valeurs de perméabilité intrinsèque déterminées à partir des essais étaient au tour de  $10^{-15}$  m<sup>2</sup> pour les échantillons de GCL sans fissures. Concernant l'écoulement de liquide au travers les étanchéités composites GM-GCL-CCL du a un endommagement de la GM, on a mesuré des débits de fuite au tour de  $10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s pour les conditions étudiés.

D'autres facteurs comme les chemins préférentielles de flux et les fissures de bentonite du à la perte de teneur en eau affectent plus significativement l'efficacité des GCLs comme barrière. Les suggestions qui suivent pointent des directions pour nouvelles recherches qui éclaircissent certain points hors scope de cette thèse

### 9.2 SUGGESTIONS POUR DES RECHERCHES FUTURES

Les résultats de cette recherche démontrent aussi l'intérêt de poursuivre ces travaux pour approfondir ou éclaircir certains points.

La détermination de l'indice des vides entre les couches argileuse et de l'indice des vides entre les particules de bentonite semble être une question clé dans la compréhension du comportement des bentonites de nature différente. Le gonflement plus important des bentonites sodiques naturelles est du à la fixation d'eau plus importante entre les couches de silicate de l'argile. Cependant, en termes de comportement de la bentonite, les vides entre les silicates devraient être distingués des vides entre les particules. Des recherches précédentes, Camapum de Carvalho (2007) et Campos et al. (2008), indiquent que le comportement des matériaux expansifs est influencé par les vides entre les particules, ce qui pourrait expliquer les teneurs en eau gravimétriques plus élevées dans les bentonites sodiques naturelles et calciques activés comparées aux bentonites calciques naturelles, pour atteindre la même valeur de perméabilité au gaz. Dans la littérature on ne trouve pas encore d'informations permettant de différencier quantitativement les vides entre les silicates des vides entre les



particules d'argile, même si une analyse qualitative a été présentée par Camapum de Carvalho (2007) et Campos et al. (2008).

Le dessèchement de la bentonite à l'intérieur du GCL s'est avéré un paramètre très important vis-à-vis de la perméabilité au gaz de ces matériaux. Il serait donc intéressant de réaliser des essais de perméabilité avec des cycles de séchage et de réhydratation dans le but de vérifier la capacité d'auto-cicatrisation des fissures de dessiccation. Il serait également intéressant de déterminer la limite de perte de teneur en eau où l'auto-cicatrisation n'est plus possible.

L'échange de cations monovalents par des cations bivalents dans la bentonite est inévitable à long terme. Il serait donc aussi intéressant de réaliser des essais de longue durée pour évaluer l'évolution du flux au travers des étanchéités composites en fonction de l'échange cationique. Ces essais pourraient démontrer si l'échange cationique de la bentonite à l'intérieur du GCL peut contribuer à une augmentation du flux de liquide au travers de l'étanchéité composite.

## ***Referências Bibliográficas***

---

ABNT NBR 8419:1992 Versão Corrigida: 1996. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, 20p.

Arlst, K.J. & Wolsfeld, N., 2004, Angepasste Oberflächenabdichtungs-Systeme für Monodeponien de Stahlindustrie – Jahre Monitoring der 12 Test-felder am Standort Dillinger Hütte. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 132, Erich Schmidt Verlag, Berlin pp 241-257 (in German).

ASTM D 1557, Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>), American Society for the Testing and Materials, ASTM Book of Standards Soil and Rock (I): D420–D5876, Vol 4.08, ASTM.

ASTM D2216-05, Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, American Society for the Testing and Materials, ASTM Book of Standards Soil and Rock (I): D420–D5876, Vol 4.08, ASTM.

ASTM D 4318, Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, American Society for the Testing and Materials, ASTM Book of Standards Soil and Rock (I): D420–D5876, Vol 4.08, ASTM.

Aubertin, M., Aachid, M. and Authier, K., 2000, Evaluation of diffusive gas flow through covers with a GCL. Geotextiles and Geomembranes, 18(2-4): 215-233.

Baehr, A.L. & Hult, M.F. (1991). Evaluation of unsaturated zone air permeability through pneumatic tests. Water Resources Research, 27(10): 2605-2617.

Barral, C., 2008, Etude des transferts d'eau et de gaz dans les géomatériaux argileux utilisés dans les couvertures des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND). Ph.D. Thesis, University of Grenoble, France, 202 p.

Barral, C., Oxarango, L. and Pierson, P., 2009, Characterizing the gas permeability of natural and synthetic materials. Transport in Porous Media. Submission DOI 10.1007/s11242-009-9398-x (in press).

Barroso, M., 2005, Fluid migration through geomembrane seams and through the interface between geomembrane and geosynthetic clay liner. Ph.D. thesis, University of Grenoble/University of Coimbra, France/Portugal, 215 p.

Barroso, M., Touze-Foltz, N., von Maubeuge, K. & Pierson, P., 2006, Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. Geotextiles and Geomembranes. 24(3): 139–155.

- Barroso, M., Touze-Foltz, N. & von Maubeuge, K., 2008, Influence of the textured structure of geomembranes on the flow rate through geomembrane-GCL composite liners, Proceedings of EuroGeo 4, Edinburgh, Scotland, 8p. (CD-ROM).
- Barroso, M., Lopes, M.G.D.A & Bergamini, G., 2010. Effect of the waste pressure on fluid migration through geomembrane defects.
- Bathurst, R.J., 2007, Geosynthetics classification. Leaflets on Geosynthetics Applications, International Geosynthetics Society, IGS, 2p.
- Bear, J., 1972, Dynamics of Fluids in Porous Media. Dover Publications Inc., Paris, 764 p.
- Benson, C.H., Thorstad, P.A., Jo, H.-Y. & Rock, S.A., 2007, Hydraulic performance of geosynthetic clay liners in a landfill final cover. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. 133(7): 814-827.
- Bergamini, G., Barroso, M. & Lopes, G., 2009. A problemática da integridade da geomembrana: influência da pressão dos resíduos na migração de fluidos através de orifícios. 3º Seminário Português sobre Geossintéticos, Coimbra, Portugal, 12 p. (CD-rom).
- Blümel, W., Müller-Kirchenbauer, A., Ehrenberg, H. & von Maugeuge, K., 2006, Experimentelle Nachweise zur Funktionsdauer von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. 7th German Geosynthetic Conference. Geotechnik special issue 2001, DGGT, pp. 79-83.
- Boardman, B.T., & Daniel, D.E., 1996. Hydraulic conductivity of desiccated geosynthetic clay liners. Journal of Geotechnical Engineering, 122(3): 204–208.
- Bouazza, A., 1997. Performance of geosynthetic clay liners. Proceedings of the First ANZ Conference on Environmental Geotechnics, Melbourne, Australia, pp. 307–313.
- Bouazza, A., 2002, Geosynthetic clay liners. Geotextiles and Geomembranes 20(1): 3–17.
- Bouazza, A., Jefferis, S. & Vangpaisal, T. (2007). Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet–dry cycles. Geotextiles and Geomembranes 25(3): 170–185
- Bouazza, A. & Vangpaisal, T., 2003. An apparatus to measure gas permeability of geosynthetic clay liners. Geotextiles and Geomembranes, 21(2): 85-101
- Bouazza, A. & Vangpaisal, T., 2004. Effect of straining on gas advective flow of a needle-punched GCL. Geosynthetics International, 11(4): 287-295.
- Bouazza, A. & Vangpaisal, T., 2006, Laboratory investigation of gas leakage rate through a GM/GCL composite liner due to a circular defect in the geomembrane, Geotextiles and Geomembranes. 24(2): 110–115.
- Bouazza, A., Vangpaisal, T., Jefferis, S., 2006. Effect of wet-dry cycles and cation exchange on gas permeability of geosynthetic clay liners. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 132(8): 1011–1018.

- Bouazza, A., Vangpaisal, T. & Rahman, F., 2002a, Gas migration through needle punched geosynthetic clay liners. Clay Geosynthetic Barriers - Zanzinger, Koerner & Gartung (eds), pp 165-176.
- Bouazza, A. & Zornberg, J., 2007, Geosynthetics in landfills. Leaflets on Geosynthetics Applications, International Geosynthetics Society, IGS, 2p.
- Bouazza, A., Zornberg, J. & Adam, D., 2002b, Geosynthetics in waste containments: recent advances. Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Vol. 2, pp. 445–507.
- Brace, W.F., Walsh, J.B. & Frangos, W.J., 1968. Permeability of granite under high pressure. Journal of Geophysical research, 73(6): 2225-2236.
- Brown, K.W., Thomas, J.C., Lytton, R.L., Jayawickrama, P. & Bhart, S., 1987, Quantification of Leakage Rates through Holes in Landfill Liners. United States Environmental Protection Agency Report CR810940, Cincinnati, OH, 147 p.
- Brusseau, M.L., 1991. Transport of organic chemicals by gas advection in structured or heterogeneous porous media: development of a model and application to column experiments. Water Resources Research, 27 (12): 3189-3199.
- Cabral, A., Racine, I., Burnotte, F. & Lefebvre, G., 2000. Diffusion of oxygen through a pulp and paper residue barrier, Canadian Geotechnical Journal, 37, 201-217
- Camapum de Carvalho, J., 2007, Solos expansivos e colapsáveis. Relato da Sessão. Segundo Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados. Vol 2.
- Campos, I.C.O., Guimarães, E.M. & Camapum de Carvalho, J., 2008, Busca de entendimento da curva característica de materiais expansivos, Proceedings of XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - XIV COBRAMSEG, Búzios, 2008, p. 1535-1542.
- Carles, P., Egermann, P., Lenormand, R. and Lombard, J.M., 2007, Low permeability measurements using steady-state and transient methods. Proceedings of the International Symposium of the Society of Core Analysts, Calgary, 12p.
- Carman, 1956. Flow of gases through porous media. New York: Academic Press Inc., 182 p.
- Cartaud, F., Goblet, P., Touze-Foltz, N., 2005, Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane. Geotextiles and Geomembranes 23(2): 117–142.
- Cartaud, F. & Touze-Foltz, N., 2004, Influence of geotextiles at the interface of landfill bottom composite liners. Proceedings of the Third European Conference on Geosynthetics, Munich, Germany, Vol. 2, pp. 495-500.
- Claisse, P.A., Ganjian, E., Adham, T.A., 2003. A Vacuum-Air Permeability Test for in situ Assessment of Cover Concrete. Cement and Concrete Research, 33, 47-53.
- Collucci, P. & Lavagnolo, M.C., 1995, Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners. Proceedings of the Fifth International Waste Management and

- Landfill Symposium-Sardinia 2001, T.H. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann, Editors, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, Vol. 2, pp. 437–452.
- Colmanetti, J.P., 2006, Estudos Sobre a Aplicação de Geomembranas na Impermeabilização da Face Montante de Barragens de Enrocamento. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-037-06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 273 p.
- Darilek, G.T., Laine D. & Parra, J.O., 1989. The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners, Proceedings of Geosynthetics'89, Vol. 2, IFAI, San Diego, USA, pp. 456-462.
- Didier, G., 1999. Permeabilité au gaz des géosynthétiques bentonitiques partiellement saturés. Projet de normes (unpublished).
- Didier, G., Bouazza, A. & Cazaux, D., 2000. Gas permeability of geosynthetic Clay liners. Geotextiles and Geomembranes, 18(2-4): 235-250.
- Dullien, F.A.L., 1979. Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure. Academic Press, London, 396p.
- Egloffstein, T.A., 1995. Properties and test methods to assess bentonite used in geosynthetic clay liners. Geosynthetic clay liners. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 51–72.
- Egloffstein, T.A., 1997, Ion exchange in geosynthetic clay liners. Geotechnical Fabrics Report. June-July, St. Paul/USA, Vol. 15, No. 5, 38-42.
- Egloffstein, T.A., 2001, Natural bentonites - influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. Geotextiles and Geomembranes 19(7): 427–444.
- Egloffstein, T.A., 2002, Bentonite as sealing material in geosynthetic clay liners – Influence of the electrolytic concentration, the ion exchange and ion exchange with simultaneous partial desiccation on permeability. Clay Geosynthetic Barriers, Zanzinger, Koerner & Gartung (eds) 2002. Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 141-153.
- Estornell, P. & Daniel, D., 1992, Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners, Journal of Geotechnical Engineering, 18(10): 1592-1606.
- EN 14196, 2003, Geosynthetics. Test methods for measuring mass per unit area of clay geosynthetic barriers, European Committee of Standardisation.
- EN ISO 9863-1, 2005, Geosynthetics – Determination of thickness at specified pressures – Part 1: Single Layers, European Committee of Standardisation.
- Faure, Y. H., 1979. Nappes étanches: Débit et forme de l'écoulement en cas de fuite. PhD thesis, University of Grenoble, Grenoble, France (in French).
- Figg, J.W., 1973. Methods of measuring the air and water permeability of concrete. Magazine of Concrete Research, 25(85): 213-219.

- Foose, G.J., Benson, C.H. & Edil, T.B., 2001, Predicting Leakage through Composite Landfill Liners, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(6): 510-520.
- Fukuoka, M., 1986, Large Scale Permeability Test for Geomembrane Subgrade System, *Proceedings of Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, pp. 917-922.
- Gardoni, M.G. & Palmeira, E.M., 2002, Microstructure and pore characteristics of synthetic filters under confinement. *Geotechnique* 52(6): 405-418.
- Giroud, J.P., 1997, Equations for Calculating the Rate of Liquid Migration through Composite Liners Due to Geomembrane Defects. *Geosynthetics International*, 4(3-4), 335-348.
- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K. & Bonaparte, R. 1992. Rate of Leakage through a Composite Liner Due to Geomembrane Defects. *Geotextiles and Geomembranes*, 11(1): 1-28.
- Giroud, J.P. & Bonaparte, R., 1989a, Leakage through liners constructed with geomembranes—part I. Geomembrane liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 8(1), 27-67.
- Giroud, J.P. & Bonaparte, R., 1989b, Leakage through Liners Constructed with Geomembranes - Part II. Composite Liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 8(2), 71-111.
- Giroud, J.P., Khatami, A. & Badu-Tweneboah, K., 1989, Evaluation of the Rate of Leakage through Composite Liners, *Geotextiles and Geomembranes*, 8(4): 337-340.
- Giroud, J.P. & Touze-Foltz, N., 2003. Geomembranes for landfills. *Geosynthetics International*, 10(4), 124-133.
- Gleason, M., Daniel, D. & Eykholt, G., 1997, Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123 (5): 438-445.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Mineralogy*, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York.
- Grim, R.E. & Güven, N., 1978. *Bentonites. Geology, Mineralogy, Property and Uses. Developments in Sedimentology* 24, Elsevier, Amsterdam.
- Guyonnet, D., Cazaux, D., Touze-Foltz, N., Didier, G., Couradin, A., Norotte, V. & Bour, O., 2007, French approach to equivalence in landfill geological barriers. *Proceedings of the Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium- Sardinia 2007*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 11 p.
- Guyonnet, D., Gaucher, E., Gaboriau, H., Pons, C.-H., Clinard, C., Norotte, V. & Didier, G., 2005, Geosynthetic clay liner interaction with leachate: correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(6): 740-749.
- Guyonnet, D., Touze-Foltz, N., Norotte, V., Pothier, C., Didier, G., Gailhanou, H., Blanc, P., & Pantet, A., 2008, *Projet LIXAR2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques*

- bentonitiques. Rapport Final. (Projet LIXAR2 – Performance indicators for geosynthetic clay liners. Final Report). BRGM Report N° 56356-FR. [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)
- Guyonnet, D., Touze-Foltz, N., Norotte, V., Pothier, C., Didier, G., Gailhanou, H., Blanc, P., & Warmont, F., 2009, Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5): 321–331.
- Harpur, W.A., Wilson-Fahmy, R.F & Koerner, R.M., 1993, Evaluation of the contact between geosynthetic clay liners and geomembranes in terms of transmissivity. *Proceedings of the Seventh GRI Conference on Geosynthetic Liners Systems: Innovations, Concerns and Design*, IFAI, St. Paul, MN, pp. 138-149.
- Hasenpatt, R., 1988, Bodenmechanische Veränderungen reiner Tone durch Adsorption chemischer Verbindungen (Batch-und Diffusionsversuche). *Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETHZ*, No. 134. (in German).
- Haskett, S.E., Narahara, G.M. and Holditch, S.A., 1988, A method for simultaneous determination of permeability and porosity in low-permeability cores. *Proceedings of Annual Technical Conference and Exhibition of the Society Petroleum Engineers (SPE)*, New Orleans, 8p.
- Heerten, G. & von Maubeuge, K., 1997, Auswirkungen von Wassergehaltsschwankungen in vernadelten Geosynthetischen Tondichtungsbahnen auf ihre Wirksamkeit als Dichtungselement, 5. Informations- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik, München, in German.
- Heerten, G. & Reuter, E., 2002, Die Bedeutung der DIBt-Zulassungen für die Qualitätsanforderungen an Bentonitmatten heute und morgen. 18<sup>th</sup> SKZ landfill conference, Würzburg (in German).
- Henken-Mellies, W.U, 2005, Long-term observations of alternative landfill capping systems – Field test on a landfill in Bavaria. 16<sup>th</sup> Nuremberg landfill seminar 2005, LGA (in German).
- Imaizumi, S., Nakamura, K., Matsuyama, S., Konishi, Y. & Kanou, H. 2006. Improvement of waste landfills using geosynthetics in Japan. *Proceedings 8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohama, ISBN 90 5966 044 7, 351-354.
- ISO 10318:2005. Geosynthetics – Terms and definitions
- ISO CD 10773. Geosynthetic Clay Barriers: Determination of gas flow through a GCL or GCB (Geosynthetic Clay Liner or Geosynthetic Clay barrier) (under development)
- Jayawickrama, P.W., Brown, K.W., Thomas, J.C. & Lytton, R.L., 1988. Leakage rates through flaws in membrane liners. *Journal of Environmental Engineering*, 114(6): 1401-1420.
- Klinkenberg, L.J., 1941. The permeability of porous media to liquids and gases. *API Drilling and Production Practice*, 200-213.
- Koerner, R.M., 1994. *Designing with Geosynthetics*. 3rd edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, Third Edition, 783p.

- Koerner, R.M. & Daniel, D.E., 1997. Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps. ASCE Press, Virginia, USA.
- Koerner, G.R. & Koerner, R.M., 2002. Geomembrane leakage arising from broken needles with GCLs. Clay Geosynthetic Barriers - Zanzinger, Koerner & Gartung (eds), Balkema, Netherlands, pp 209-217.
- Kotake, N., Tsurugasaki, K. & Tesuka, T. 2006. A coastal waste disposal site on permeable ground in the inland sea of Japan. Proceedings 8th International Conference on Geosynthetics, ISBN 90 5966 044 7, 237-240.
- Laine, D.L., 1991., Analysis of pin hole seam leak located in geomembrane liners using electrical leak location method. Proceedings of Geosynthetics'91, Atlanta, pp. 239-253.
- Laine, D.L. and Darilek, G.T., 1993. Locating Leaks in Geomembrane Liners of Landfills Covered With a Protective Soil. Geosynthetics '93 Conference Proceedings, Vancouver, British Colombia, Canada, IFAI, pp. 1403-1412.
- Li, H., Jiao, J.J. & Luk, M., 2004. A falling-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory. Journal of Hydrology, 286(1-4): 69-77
- Lin, L.-C., & Benson, C. H., 2000. Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(1): 40-49.
- Madsen, F. & Nuesch, R., 1994, Characteristics and sealing effect of bentonites. Geosynthetic Clay Liners, R. Koerner, E. Gartung and H. Zanzinger, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield, 73-98.
- Manassero, M., Benson, C. & Bouazza, A. (2000). Solid waste containment systems. Proceedings International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, pp. 520-642
- McBean, E.A., Rovers, F.A. and Farquhar, G.J., 1995, Solid waste landfill: Engineering and design. Prentice-Hall PTR, Englewood Cliffs, N.J
- MEEDDAT, 2009, Guide de recommandations, à l'usage des tiers experts, pour l'évaluation de l'équivalence en étanchéité de site de stockage de déchets. Version 2. Guide of recommendations, for third party experts, relative to the assessment of equivalence in landfill barriers. Version 2, Edited by the French Ministry of the Environment, Paris, France, 52 p.
- Meer, S.R. & Benson, C.H. 2007. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(5): 550-563.
- Mendes, M.J.A., Palmeira, E.M. & Matheus, E., 2007, Some factors affecting the in-soil load-strain behaviour of virgin and damaged nonwoven geotextiles. Geosynthetics International, 14(1): 39-50.



- Mendes, M.J.A., Touze-Foltz, N., Palmeira, E.M., & Pierson, P., 2010. Influence of structural and material properties of GCLs on interface flow in composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International*, 17(1): 1–14.
- Melchior, S., 2002, Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers. *Clay Geosynthetic Barriers - Zanzinger, Koerner & Gartung (eds)*, pp. 321-330.
- Navarro, N., 1999, Quantification des débits de fuite dans des étanchéités composites des centres de stockage de déchets. Master of Science Géomatériaux. École Supérieure des Mines de Paris, France, 63p. (in French)
- NF P 84-705, 2008, Détermination à l'oedoperméamètre des caractéristiques de gonflement – Flux et perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB). (Oedopermeameter Determination of Swelling Characteristics – Flux and Permeability of Geosynthetic Clay Liners (GCL)). French Association for Normalization, AFNOR, Paris.
- Nosko, V., Andrezal, T, Gregor, T., & Ganier, P., 1996. SENSOR Damage Protection Damage Detection System (DDS) - The unique geomembrane testing method. *Proceedings of the First European Geosynthetics Conference, Eurogeo I*, A.A. Balkema, Maastricht, Netherlands, pp.743 - 748.
- Nosko, V. & Touze-Foltz, N., 2000, Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer. *Proceedings of the Second European Conference on Geosynthetics, Bologna, Italia, Vol. 2*, pp. 557-560.
- Palmeira, E.M. 2001. Aspectos relacionados à utilização de geossintéticos em obras de proteção ambiental. *Seminário Nacional sobre Geossintéticos na Geotecnia Ambiental – GEOSSIGA 2001*, São José dos Campos, 1-10.
- Palmeira, E.M., & Gardoni, M.G., 2000, The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics International*, 7(4-6): 406-431.
- Palmeira, E.M. & Gardoni, M.G., 2002, Drainage and filtration Properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. *Geotextiles and Geomembranes*, 20(2): 97-115.
- Phaneuf, R. & Peggs, I.D., 2001, Landfill construction quality :lessons lerned from electrical resistivity testing of geomembrane liners. *Geotechnical Fabrics Report*, 19(3): 28-35.
- Peggs, I.D., 2001, Three challenging electrical integrity/leak surveys on uncovered and deep water-covered liners. *Proceedings of the Geosynthetics 2001, Portland, USA, Vol. 1*, pp. 245-262.
- Petrov, R.J. & Rowe, K., 1997, Geosynthetic clay liner – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6): 863-885.
- Petrov, R.J., Rowe, R.K. & Quigley, R.M., 1997, Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geo-Environmental Engineering, ASCE*, 123: 683-695.

- Pitanga, H.N., 2007, Caracterização dos comportamentos hidráulico e mecânico de geocompostos bentoníticos e de outros sistemas geossintéticos destinados às camadas de cobertura de aterros sanitários Tese de doutorado, Université Joseph Fourier, Grenoble I, e Universidade de São Carlos, 314 p.
- Pitanga H.N., Pierson P. and Vilar O.M., 2009, Measurement of gas permeability in geosynthetic clay liners in transient flow mode. Submitted to Geosynthetics International (under review).
- Potié, G., Steiner, B., Ailloud, G. & Matichard, Y. 1997. Storage capping with geosynthetics liners for industrial waste landfills. *Rencontres 97 Géotextiles-Géomembranes*, 2, 117-123.
- Rollin, A.L., Marcotte, M., Jaquelin, T. & Chaput, L., 1999, Leak location in exposed geomembrane liners using an electrical leak detection technique. *Proceedings of Geosynthetics '99*, Boston, Massachusetts, Vol. 2, pp. 615-626.
- Rollin, A.L., Marcotte, M. & Chaput, L., 2002, Lessons Learned from Geo-electrical Leaks Surveys, *Proceedings of Seventh International Conference on Geosynthetics*, Vol. 2, Nice, France, pp. 527-530.
- Rowe, R.K., 1998. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. Keynote Lecture, *Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, Vol. 1, pp. 27-103.
- Rowe, R.K. 1999. Solid Waste Disposal Facilities for Urban Environments. Keynote Lecture, *Proceedings of the XI Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Foz do Iguassu, Brazil. 1-22.
- Rowe, R.K. 2005. Long-term performance of contaminant barrier systems. *Géotechnique*, 55(9), 631-638.
- Rowe, R.K., 2007, Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications. *Soils and Rocks*, 30(1): 3-30.
- Shan, H. Y., and Daniel, D. E., 1991, Results of laboratory tests on a geotextile/bentonite liner material. *Proceedings of Geosynthetics 91 Conference*, Vol. 2, IFAI, 517-535
- Shan, H.Y. & Yao, J.T., 2000. Measurement of air permeability of geosynthetic clayliners. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2-4): 251.
- Siegmund, M., Witt, K.J., Alexiew, N., 2001, Calcium-Bentonit-matten unter Feuchtigkeitsänderungen – in, *Sonderheft Geo-technik*, 7. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München, pp 97-104 (in German).
- Sivakumar Babu, G.L., Sporer, H., Zanzinger, H. & Gartung, E., 2001, Self-healing properties of geosynthetic clay liners. *Geosynthetics International*, 8(5): 461-470.
- Sivakumar Babu, G.L., Sporer, H., Zanzinger, H. & Gartung, E. (2002). Desiccation behaviour of selected geosynthetic clay liners. *Clay Geosynthetic Barriers - Zanzinger, Koerner & Gartung (eds)*, pp. 295-302.

- Soltani, F., 1997. Étude de l'écoulement de gaz à travers les géosynthétiques bentonitiques utilisées en couverture des centres de stockage de déchets. These de Doctorat, INSA, Lyon, France.
- Sporer H. 2002. Exhumed clay geosynthetic barriers. Presentation at International symposium on clay geosynthetic barriers in Nuremberg, unpublished.
- Sporer, H. & Gartung, E., 2002, Laboratory tests on desiccation on geosynthetic clay liners. Zanzinger, Koerner & Gartung (eds.), Clay Geosynthetic Barriers, Balkema, Netherlands, pp 339-343.
- Sporer, H., Sivakumar Babu, G.L., & Gartung, E., 2000, Desiccation tests on GCL. 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference, EuroGeo2, pp. 751-754.
- Stonestrom, D.A. & Rubin, J., 1989. Air permeability and trapped-air content in two soils. Water Resour. Res., 25(9): 1959-1969.
- Touze-Foltz, N., 2001, Modélisation des Transferts Advectifs dans les Etanchéités Composites de Centres de Stockage de Déchets. PhD. Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 288 p. (in French).
- Touze-Foltz, N., 2002, Evaluation of the hydraulic transmissivity in soil liner-geomembrane interface. Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Vol. 2, pp. 799-802.
- Touze-Foltz, N. & Barroso, M., 2006, Empirical Equations for Calculating the Rate of Liquid Flow through GCL-Geomembrane Composite Liners. Geosynthetics International, 13(2), 73-82.
- Touze-Foltz, N., Darlot, O. & Barroso, M., 2002, Experimental Investigation of the influence of the pre-hydration of GCLs on the leakage rates through composite liners. Clay Geosynthetic Barriers, Zanzinger, Koerner & Gartung (eds) 2002. Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 265-274.
- Touze-Foltz, N. & Giroud, J.P., 2003, Empirical Equations for Calculating the Rate of Liquid Flow through Composite Liners Due to Geomembrane Defects. Geosynthetics International, 10(6), 215-233.
- Touze-Foltz, N. & Giroud, J. P., 2005. Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to large circular defects in the geomembrane. Geosynthetics International, 12(1): 205–207.
- Touze-Foltz, N., Lupo, J. & Barroso, M., 2008, Geoenvironmental applications of geosynthetics. Keynote Lecture, Proceedings of the Fourth European Conference on Geosynthetics - Eurogeo 4, Edinburgh, Scotland, 98 p.
- Touze-Foltz, N., Nosko, V. & Morcet, M., 2002, Hydraulic performance of a composite bottom liner in a municipal solid waste landfill. Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Vol. 2, pp. 535-538.

- Touze-Foltz, N., Rowe, R.K. & Duquennoi, C., 1999, Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: analytical solutions for axi-symmetric and two-dimensional problems. *Geosynthetics International* 6(6): 455-479 (Erratum: 2000, 7(1), 77).
- Vangpaisal, T. & Bouazza, A., 2004. Gas permeability of partially hydrated geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engng.*, ASCE 130(5): 93-102.
- Vangpaisal, T., Bouazza, A. & Kodikara, J., 2002, Gas permeability of a needle punched geosynthetic clay liner subjected to wetting and drying. *Geosynthetics – 7th ICG – Delmas, Gourc & Girard (eds), vol 2 pp. 841-844.*
- XP P 84-703, 2002, Détermination de la capacité de gonflement de l'argile dans les géosynthétiques bentonitiques. French Association for Normalization, AFNOR, Paris.
- XP P 84-707, 2002, Géosynthétiques bentonitiques - Perméabilité aux gaz des géosynthétiques bentonitiques partiellement saturés. French Association for Normalization, AFNOR, Paris.
- Yanful, E. K., 1993, Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering* 119(8): 1207–1228.
- Zanzinger, H., 2008, Evaluation of Clay Geosynthetic Barriers in Landfill Cover Systems Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics in Shanghai, China, pp 496-501.
- Zanzinger, H. & Gartung, E. 2002. Landfills. In *Geosynthetics and their applications*, Edited by Sanjay Kumar Shukla, Published by Thomas Telford Publishing, ISBN 0 7277 3117 3, 259-279.